



TUGAS AKHIR - RE 141581

**KAJIAN APLIKASI TEKNOLOGI
STABILISASI/SOLIDIFIKASI UNTUK REMEDIASI
TANAH TERCEMAR LIMBAH B3**

ROYYAN ANROZI
3313 100 040

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - RE 141581

**KAJIAN APLIKASI TEKNOLOGI
STABILISASI/SOLIDIFIKASI UNTUK REMEDIASI
TANAH TERCEMAR LIMBAH B3**

ROYYAN ANROZI
3313100040

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - RE 141581

**STUDY ON APPLICATION OF
STABILIZATION/SOLIDIFICATION
TECHNOLOGY FOR REMEDIATION OF
HAZARDOUS WASTE CONTAMINATED SOIL**

ROYYAN ANROZI
3313100040

Supervisor

Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc.

**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

HALAMAN PENGESAHAN

KAJIAN APLIKASI TEKNOLOGI STABILISASI/SOLIDIFIKASI UNTUK REMEDIASI TANAH TERCEMAR LIMBAH B3

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ROYYAN ANROZI
NRP. 3313100040

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

NIP. 19530706 198403 2 004



KAJIAN APLIKASI TEKNOLOGI STABILISASI/SOLIDIFIKASI UNTUK REMEDIASI TANAH TERCEMAR LIMBAH B3

Nama Mahasiswa : Royyan Anrozi
NRP : 3313100040
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum,
M.App. Sc.

ABSTRAK

Pencemaran tanah oleh limbah B3 sering terjadi akibat aktivitas manusia. Pencemaran tanah tidak hanya terjadi di negara maju namun juga di negara berkembang. Salah satu teknologi untuk meremediasi tanah tercemar adalah stabilisasi/solidifikasi (S/S). Namun aplikasi S/S pada tanah tercemar limbah B3 di Indonesia masih sangat terbatas. Oleh karena itu diperlukan kajian pustaka mengenai aplikasi teknologi S/S untuk remediasi tanah tercemar limbah B3 beracun. Pada kajian pustaka ini akan diidentifikasi teknologi, mekanisme, keunggulan dan kelemahan aplikasi proses S/S dalam remediasi tanah tercemar limbah B3 beracun. Kajian pustaka ini juga membahas aplikasi S/S pada studi kasus baik di negara maju maupun negara berkembang dengan menggunakan teori-teori yang ada.

Kajian pustaka ini bersumber dari *text book*, peraturan perundangan, jurnal ilmiah nasional dan internasional, makalah, tugas akhir, tesis, disertasi, dan karya ilmiah lain yang berhubungan dengan ide studi. Jurnal yang diutamakan adalah jurnal ilmiah dengan tahun publikasi 10 tahun terakhir. Informasi yang berkaitan dengan studi kasus didapatkan dari jurnal ilmiah internasional dan referensi ilmiah lainnya.

Hasil kajian pustaka menunjukkan bahwa mekanisme S/S adalah mengurangi sifat berbahaya limbah dengan cara mengurangi laju migrasi dan toksisitasnya. Teknologi S/S terbagi menjadi tiga bagian yaitu S/S secara fisik, kimia, dan termal. S/S secara fisik adalah proses S/S yang tidak melibatkan bahan kimia. S/S secara kimia adalah proses S/S

yang memerlukan reaksi kimia untuk memungkinkan proses S/S berlangsung. S/S secara termal (vitrifikasi) adalah proses S/S yang menggunakan panas untuk melelehkan dan mensolidifikasi senyawa berbahaya pada massa yang solid seperti bahan-bahan yang mempunyai sifat seperti gelas. Beberapa keunggulan aplikasi proses S/S diantaranya biaya yang relatif rendah, produk S/S memiliki stabilitas jangka panjang yang baik dan bersifat inert. S/S dapat diterapkan pada berbagai macam kontaminan dan pada berbagai macam jenis tanah. Beberapa kelemahan aplikasi produk S/S adalah kontaminan masih ada di dalam tanah, terkadang sulit memasukkan reagen ke dalam tanah yang akan diolah. Studi kasus yang berhasil ditangani dengan S/S adalah kasus remediasi kolam tar yang tercemar logam berat dan PAHs di Sydney, Nova Scotia, Kanada. Proses S/S diterapkan secara *in situ* pada sedimen kolam tar dengan menggunakan campuran semen *portland*, *slag* dan abu terbang. Setelah diremediasi, lahan bekas kolam tar yang terkontaminasi ditutup dengan lapisan penutup dan digunakan untuk area taman. Kasus pencemaran tanah akibat merkuri di tambang emas rakyat Sangon, Kulon Progo, Indonesia belum mendapatkan upaya remediasi. Remediasi tanah tercemar yang direkomendasikan adalah S/S secara *ex situ*.

Kata kunci: kajian pustaka, limbah B3, remediasi tanah, stabilisasi/solidifikasi, tanah tercemar

STUDY ON APPLICATION OF STABILIZATION/SOLIDIFICATION TECHNOLOGY FOR REMEDIATION OF HAZARDOUS WASTE CONTAMINATED SOIL

Name of Student : Royyan Anrozi
Student ID : 3313100040
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum,
M.App. Sc.

ABSTRACT

Soil contamination by hazardous waste is often caused by human activity. Soil contamination not only happens in developed countries but also in developing countries. Stabilization/solidification (S/S) is a technology that can remediate contaminated soil so it can decrease the solubility and immobilization of contaminants. However, the application of S/S in hazardous waste contaminated soil is still limited. Therefore it is necessary to conduct literature study about S/S technology application for remediation of toxic hazardous waste contaminated soil. This literature study aimed to identify the technology, mechanisms, advantages, and disadvantages of S/S process applications in toxic hazardous waste contaminated soil. It also discussed S/S applications in case studies in both developed and developing countries using collected theories.

This literature study used textbooks, regulations, national and international scientific journals, articles, undergraduate and master theses, dissertations, and other scientific sources related to the idea of the literature study as the literature sources. The major journals used are scientific journals with the last 10-year publication. Related information about case studies was obtained from scientific journals and other scientific references.

The results of this literature study showed that the S/S mechanism could reduce the hazardous properties of the

waste by reducing its rate of migration and its toxicity. S/S technology is divided into chemical, physical, and thermal S/S. Chemical S/S require a chemical reaction to allow the process perform. Physical S/S do not involve chemical reactions. Thermal S/S (vitrification) uses heat to melt and then solidify harmful chemicals in a solid mass of glasslike material. Some advantages of S/S processes application are low cost, S/S product has a good long-term stability and inert. S/S is applicable on various soil contaminants. Some disadvantages of S/S processes application are contaminants are stay in the soil (undestroyed or removed), delivering reagents deep into the wastes and mixing them evenly difficult. The successful case study of S/S application is the remediation of tar pond contaminated by heavy metals and PAHs in Sydney, Nova Scotia, Canada. The S/S process was applied in situ to remediate tar ponds sediments using a mixture of portland cement, slag and fly ash. After the remediation successfully conducted, the former contaminated-tar pond was covered with a capping layer and used for a public park. Mercury-contaminated soil case located in Sangon artisanal gold mining, Kulon Progo, Indonesia has not yet treated. Recommended treatment for remediate soil contamination in Sangon is ex situ S/S.

Keywords: literature study, stabilization/solidification, soil remediation, hazardous waste, contaminated soil

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Kajian Aplikasi Teknologi Stabilisasi untuk Remediasi Tanah Tercemar Limbah B3”

Atas dukungan yang telah diberikan hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App. Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas kesediaan, kesabaran, bimbingan dan ilmu yang diberikan.
2. Bapak Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D., Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., PhD dan Ibu Dr. Ir. Ellina S Pandebesie, MT. selaku dosen penguji tugas akhir atas saran serta bimbingan yang diberikan.
3. Keluarga penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan yang diberikan.
4. Teman-teman mahasiswa Teknik Lingkungan ITS angkatan 2013 yang mendukung dan memberi semangat kepada penulis.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu penulis menerima kritik dan saran yang membangun agar dapat menjadi evaluasi bagi penulis. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Studi.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB 2 METODE STUDI	5
2.1 Kerangka Studi	5
2.2 Metode Studi.....	7
2.2.1 Ide Studi.....	7
2.2.2 Pengumpulan Data	7
2.2.3 Hasil dan Pembahasan	8
2.2.4 Kesimpulan dan Saran	10
BAB 3 HASIL STUDI	11
3.1 Teori Stabilisasi/Solidifikasi	11
3.1.1 Definisi Stabilisasi/Solidifikasi.....	11
3.1.2 Tujuan Stabilisasi/Solidifikasi	11
3.1.3 Uji Produk Stabilisasi/Solidifikasi.....	13
3.2 Mekanisme dan Teknologi Stabilisasi/Solidifikasi	20
3.2.1. Mekanisme dan Teknologi.....	20
3.2.2. Bahan Pengikat dan Penerapan S/S.....	29
3.3 Keunggulan dan Kelemahan Aplikasi Proses Stabilisasi/Solidifikasi.....	68
3.3.1. Aplikasi pada Pencemar Organik	69
3.3.2. Aplikasi pada Pencemar Anorganik.....	72
BAB 4 PEMBAHASAN STUDI KASUS	75
4.1 Kasus Aplikasi S/S yang Berhasil Diterapkan	75
4.2 Kasus Pencemaran Logam Berat di Sungai Lembing, Malaysia.....	93

4.3 Kasus Pencemaran Merkuri di Kulon Progo, Indonesia	97
4.4 Ulasan Penanganan Tanah Tercemar Limbah B3 di Lokasi Studi Kasus	100
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	111
5.1 Kesimpulan.....	111
5.2 Saran	112
DAFTAR PUSTAKA	113
BIOGRAFI PENULIS.....	123

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kerangka Studi	7
Gambar 3. 1 Alat Uji <i>Paint Filter Test</i>	15
Gambar 3. 2 Alat Uji <i>Liquid Release Test</i>	18
Gambar 3. 3 Kapsulasi Makro Potongan-Potongan Limbah Heterogen dengan Keramik Fosfat	22
Gambar 3. 4 Stabilisasi/Solidifikasi dengan Polimer Sulfur	23
Gambar 3. 5 Limbah Organik yang Diadsorpsi pada Tanah Liat Termodifikasi	26
Gambar 3. 6 Diagram Skematik dari Dua Lapisan Bermuatan Listrik pada Permukaan Mineral dalam Fase Air; (a) dan (b) mengacu pada permukaan positif dan negatif.	27
Gambar 3. 7 Vitrifikasi secara <i>In Situ</i>	29
Gambar 3. 8 Hasil Analisis SEM pada Sampel Dengan (a) Komposisi Lumpur/Semen dan (b) Komposisi Lumpur/Semen/Bentonit	32
Gambar 3. 9 Model Kristal dari Hidrasi Semen	34
Gambar 3. 10 Sketsa Logam Berat Timbal yang Dilapisi Partikel Semen Pada Proses S/S	35
Gambar 3. 11 Bahan Pengikat Dapat Diinjeksikan ke Tanah dan Diaduk Dengan Bor.....	42
Gambar 3. 12 Bor dengan Tipe <i>Crane-mounted</i>	44
Gambar 3. 13 Bor dengan Tipe <i>Excavator-mounted</i>	45
Gambar 3. 14 <i>Batch Plant</i>	46
Gambar 3. 15 Bor untuk Pengadukan Tanah pada S/S secara <i>In Situ</i> Sumber : Bates dan Hills, 2015	46
Gambar 3. 16 <i>Pug-mill Mixer</i> dan Alat Pendukungnya	48
Gambar 3. 17 <i>Screw Mixers</i>	49
Gambar 3. 18 <i>Ribbon Blenders</i>	50
Gambar 3. 19 Ekskavator yang dilengkapi dengan <i>Bucket Mixer</i>	51
Gambar 3. 20 Ekskavator yang dilengkapi dengan <i>Rotating Rake Mixer</i> Sumber: Bates dan Hills, 2015	51
Gambar 3. 21 Ekskavator yang dilengkapi <i>Rotating Mixing Head</i> Sumber: Bates dan Hills, 2015.....	52
Gambar 3. 22 <i>Rototiller</i> untuk Rangkaian Traktor Kecil Sumber: Bates dan Hills, 2015	52

Gambar 3. 23 Ekskavator yang Mengaduk Reagen Kapur dan Limbah Terkontaminasi Minyak pada <i>Earthen Pits</i>	58
Gambar 3. 24 Pengolahan Secara <i>Ex-Situ</i> pada <i>Roll-off Box</i>	59
Gambar 3. 25 Lapisan Penutup Monolit S/S	63
Gambar 4. 1 Lokasi Kolam Tar di Sydney Nova Scotia, Kanada	76
Gambar 4. 2 Lokasi Kolam Tar dan Coke Oven	76
Gambar 4. 3 Uji Coba Lapangan untuk Menentukan Komposisi Campuran	80
Gambar 4. 4 Hasil Uji Kuat Tekan Sampel Kolam Tar Sydney Bagian Utara.....	81
Gambar 4. 5 Hasil Uji Kuat Tekan Sampel Kolam Tar Sydney Bagian Selatan	82
Gambar 4. 6 Lapisan Penutup Dibawah Kanal Ditimbun Kembali dengan Batu Pecah.....	84
Gambar 4. 7 Pemasangan Lapisan Penutup untuk Konstruksi Kanal.....	84
Gambar 4. 8 Sistem Pemompaan untuk Mengalihkan Aliran Agar Tidak Memasuki Kolam Tar	85
Gambar 4. 9 Pengeringan Bagian Selatan Kolam Tar Sydney ..	85
Gambar 4. 10 Pencampuran Bahan Solidifikasi dan Sedimen Kolam Tar Sydney dengan Menggunakan Ekskavator	86
Gambar 4. 11 Peralatan Sampling Sedimen Menggunakan <i>Ekmar Grab</i> (a) dan <i>Gravity Corer</i> (b), Pengambilan Sedimen dengan Perahu (c), Tabung untuk Mengambil Sampel Air (d) dan Pengambilan Sampel Kepiting (e).....	86
Gambar 4. 12 Lokasi Titik Pemantauan.....	87
Gambar 4. 13 Variasi Konsentrasi Logam Berat pada Sedimen Permukaan Kolam Tar Sydney	89
Gambar 4. 14 Variasi Konsentrasi Total PAH pada Sedimen Permukaan Kolam Tar Sydney	90
Gambar 4. 15 Lapisan Penutup Kolam Tar Sydney	91
Gambar 4. 16 Konstruksi Lapisan Penutup di Lokasi Remediasi Kolam Tar Sydney	92
Gambar 4. 17 Hasil Akhir Penutupan Lokasi Remediasi Kolam Tar Sydney	92

Gambar 4. 18 Open Heart Park bekas Kolam Tar Sydney	93
Gambar 4. 19 Peta Lokasi Tambang Timah Sungai Lembing	94
Gambar 4. 20 Lokasi Pengambilan Sampel <i>Tailing</i> dan Tanah di Kawasan Tambang Sungai Lembing	95
Gambar 4. 21 Peta Administrasi Kecamatan Kokap.....	98
Gambar 4. 22 Kolam Penampungan Tailing di Kecamatan Kokap	99
Gambar 4. 23 Pembuangan <i>Tailing</i> di Sekitar Lokasi Gelundung	100
Gambar 4. 24 Penggunaan Foam pada Proses S/S untuk Pengendalian Bau dan Uap	104
Gambar 4. 25 Penutupan S/S dengan Konfigurasi Geomembran dan <i>Geosynthetic Clay Liner</i>	105
Gambar 4. 26 Penggalian Tanah Menggunakan Ekskavator ...	108
Gambar 4. 27 Rancang Bangun Landfill Kategori 3.....	110

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Jenis-Jenis Metode Uji Pelindian	13
Tabel 3. 2 Jenis-Jenis Uji Fisik.....	19
Tabel 3. 3 Contoh Aplikasi Kapsulasi Termoplastik	25
Tabel 3. 4 Komposisi Kimia Tanah Tras	30
Tabel 3. 5 Komposisi Kimia Bentonit.....	31
Tabel 3. 6 Komposisi Kimia Semen <i>Portland</i>	35
Tabel 3. 7 Kandungan Kimia <i>Fly Ash</i> Kelas C dan Kelas F ..	37
Tabel 3. 8 Komposisi Kimia <i>Fly Ash</i>	37
Tabel 3. 9 Komposisi Kimia Abu Sekam Padi	39
Tabel 3. 10 Contoh Aplikasi Berbagai Bahan Pengikat untuk S/S	39
Tabel 3. 11 Rasio Kimia CaO : SiO ₂ : Al ₂ O ₃ Setiap Bahan Pengikat.....	40
Tabel 3. 12 Tabel Peralatan untuk S/S Secara <i>Ex Situ</i>	53
Tabel 3. 13 Keunggulan dan Kelemahan <i>Mixing Pits</i>	60
Tabel 3. 14 Efektifitas Berbagai Jenis Material sebagai Lapisan Penutup Monolit S/S	66
Tabel 3. 15 Efektifitas Stabilisasi/Solidifikasi pada Berbagai Jenis Kontaminan	69
Tabel 3. 16 Kecocokan Limbah Organik dengan Teknik Stabilisasi/Solidifikasi	71
Tabel 3. 17 Kesesuaian Limbah Anorganik dengan Teknik Stabilisasi/Solidifikasi	73
Tabel 4. 1 Kuantitas Bahan Pengikat untuk S/S Kolam Tar Bagian Utara.....	78
Tabel 4. 2 Kuantitas Bahan Pengikat untuk S/S Kolam Tar Bagian Selatan	79
Tabel 4. 3 Konsentrasi Logam Berat pada Tanah Tercemar di Kawasan Sungai Lembing.....	96
Tabel 4. 4 Konsentrasi Logam Berat pada <i>Tailing</i> Tambang Timah Sungai Lembing.....	96
Tabel 4. 5 Komparasi Penanganan Tanah Tercemar Limbah B3 di Lokasi Studi Kasus.....	101
Tabel 4. 6 Studi yang Berhasil Menerapkan S/S untuk Imobilisasi Logam Berat	103
Tabel 4. 7 Studi yang Berhasil Menerapkan S/S untuk Imobilisasi Merkuri	106

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan lingkungan yang penting dimana batuan, udara, dan air saling berinteraksi. Oleh karena itu tanah menjadi subjek berbagai macam polusi yang disebabkan oleh berbagai aktifitas manusia termasuk industri (Facchinelli *et al.*, 2001). Menurut Palar (2008) pencemaran adalah suatu kondisi yang telah berubah dari kondisi asal ke kondisi yang lebih buruk sebagai akibat masukan dari bahan-bahan pencemar atau polutan. Tanah yang tercemar dapat menjadi penyebab timbulnya penyakit baik penyakit menular maupun tidak menular (Wardhana, 2001). Dalam berbagai kasus, pencemaran tanah juga disebabkan oleh limbah bahan berbahaya dan beracun (B3).

Solusi baru dan inovatif untuk menghilangkan kontaminan dari tanah secara efisien telah diselidiki selama beberapa tahun terakhir (Virkutyte *et al.*, 2002). Salah satu solusi untuk mengatasi tanah tercemar adalah stabilisasi/solidifikasi (S/S) dari limbah padat dengan cara menambahkan pengikat semen, seperti kapur dan semen. Selama aplikasi S/S, senyawa beracun yang ada pada limbah akan stabil secara fisik dan kimia. Artinya mobilitas senyawa beracun secara signifikan berkurang hingga meminimalkan ancaman terhadap lingkungan (Dermatas dan Meng, 2003).

Dalam proses S/S diperlukan zat aditif yang akan bereaksi sebagai pemadat limbah yang akan diolah. Pada umumnya semen *portland* ditambahkan sebagai pozzolan yang berfungsi untuk mengikat kontaminan dalam limbah (US EPA, 1999). Menurut Wiqoyah (2007), pozzolan pada dasarnya adalah bahan alam atau buatan yang sebagian besar kandungannya terdiri atas unsur-unsur silika dan alumina atau keduanya. Menurut ACI (1993) dalam Paat *et al.* (2014), pozzolan alam atau hasil pembakaran antara lain tanah *diatomic*, *opaline chert*, *shales*, *tuff* dan abu vulkanik yang mana biasa diproses melalui pembakaran atau tidak melalui proses pembakaran. Selain itu juga mempunyai sifat pozzolan yang baik. Sedangkan menurut Suryoatmono dan Susilorini (2007), contoh pozzolan artifisial (buatan) adalah *fly ash*, dan produk abu terbang yang berasal

dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik, abu sekam padi (*rice husk ash*), debu bata (*brick dust*), kaolin berkapur (*calcined kaolin*), *condensed silica fume*, dan beberapa *slag* metalurgis.

Banyaknya pencemaran tanah dan alternatif pozzolan yang ada membuat beberapa peneliti dalam dan luar negeri berhasil meremediasi tanah tercemar dengan teknik stabilisasi/solidifikasi. Hasil penelitian Yin *et al.* (2006) menyatakan penggunaan semen *portland* biasa dengan abu sekam padi sebagai sistem pengikat terbukti lebih menguntungkan dalam mengurangi pelindian timbal dibandingkan hanya dengan menggunakan semen *portland* biasa sebagai sistem pengikat. Anisa (2016) juga meneliti tentang aplikasi teknologi S/S untuk tanah tercemar merkuri di tambang emas rakyat Kulon Progo Yogyakarta menggunakan komposisi campuran 10% semen *portland* dan 90% tanah tras. Dengan komposisi campuran dan tanah tercemar adalah 10 : 90 didapat nilai kuat tekan 6 kg/cm² dan total konsentrasi merkuri sebesar 0,0011 mg/L.

Amerika Serikat merupakan salah satu negara maju yang telah mengaplikasikan teknologi stabilisasi/solidifikasi. Di negara ini aspal emulsi digunakan untuk S/S tanah terkontaminasi minyak bumi sehingga menghasilkan *cold mix asphalt concrete* (CMA). Hasil uji stabilitas Marshall menyatakan bahwa CMA yang dihasilkan cukup kuat untuk digunakan dalam jalan bervolume rendah (500 dan 1400 lb stabilitas Marshall) (Meegoda, 1999).

Di Indonesia terdapat banyak lokasi pencemaran tanah oleh limbah B3 yaitu di lahan pertambangan minyak dan pertambangan logam mineral. Contoh kegiatan pertambangan yang menyebabkan pencemaran tanah adalah pertambangan emas di Banten dan pertambangan minyak bumi di Bojonegoro. Pertambangan emas rakyat di daerah Cisoka, Lebak, Banten menyebabkan pencemaran tanah oleh merkuri dengan kadar rata-rata merkuri dalam tanah sebesar 5,709 ppm (Agung dan Hutamadi, 2012). Hasil tersebut melebihi ambang batas pelepasan merkuri di lingkungan menurut Peraturan Pemerintah 101/2014 tentang Pengelolaan Limbah B3 yaitu sebesar 0,05 mg/L berat kering. Pertambangan minyak bumi rakyat di daerah Wonocolo, Kadewan, Bojonegoro menyebabkan pencemaran tanah oleh *crude oil* dengan kadar *total petroleum hydrocarbon*

(TPH) sebesar 41.200 mg/kg (Handrianto *et al.*, 2012). Kadar TPH tersebut melebihi baku mutu yang berlaku berdasarkan Lampiran 2 Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2013 yaitu 1% (Kepmen LH, 2003).

Aplikasi S/S pada tanah tercemar limbah B3 di Indonesia masih sangat terbatas. Jenis pencemar, komposisi zat pengikat yang digunakan dalam proses S/S, serta hasil dari penelitian terdahulu perlu diketahui sebagai pertimbangan dalam melakukan S/S. Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perlu dilakukan studi literatur mengenai aplikasi teknologi S/S untuk remediasi tanah tercemar berbagai macam limbah B3.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang mendasari studi literatur ini adalah:

1. Bagaimana mekanisme dan teknologi proses stabilisasi/solidifikasi?
2. Bagaimana keunggulan dan kelemahan aplikasi teknologi stabilisasi/solidifikasi dalam remediasi tanah tercemar limbah B3?
3. Apa sajakah kasus-kasus pencemaran tanah yang berhasil ditangani dengan stabilisasi/solidifikasi?
4. Bagaimana aplikasi metode stabilisasi/solidifikasi untuk penanganan tanah tercemar limbah B3 di Indonesia?

1.3 Tujuan Studi

Tujuan dari studi literatur ini adalah:

1. Mengidentifikasi mekanisme dan teknologi stabilisasi/solidifikasi.
2. Mengkaji keunggulan dan kelemahan aplikasi proses stabilisasi/solidifikasi dalam remediasi tanah tercemar limbah B3.
3. Membahas kasus pencemaran tanah yang berhasil ditangani dengan stabilisasi/solidifikasi.
4. Membahas aplikasi metode stabilisasi/solidifikasi untuk penanganan tanah tercemar limbah B3 di Indonesia.

1.4 Manfaat

Manfaat dari studi literatur ini adalah:

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai teknologi stabilisasi/solidifikasi untuk remediasi tanah tercemar limbah B3 serta aplikasinya.
2. Memberikan informasi ilmiah mengenai keunggulan dan kelemahan teknologi stabilisasi/solidifikasi.

1.5 Ruang Lingkup

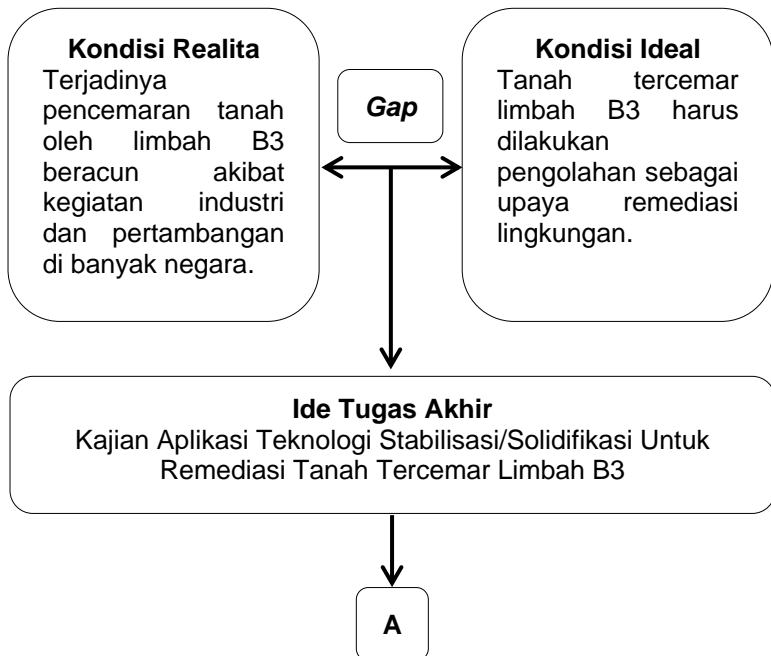
Ruang lingkup dalam studi literatur ini adalah:

1. Kasus aplikasi teknologi stabilisasi/solidifikasi dibatasi pada tanah tercemar limbah B3 bersifat beracun.
2. Metode penulisan studi literatur ini berdasarkan acuan jurnal ilmiah nasional dan internasional, prosiding seminar, peraturan perundangan, serta buku-buku terkait yang membahas teknologi stabilisasi/solidifikasi.

BAB 2 METODE STUDI

2.1 Kerangka Studi

Metode studi disusun dalam bentuk kerangka studi yaitu dasar-dasar pemikiran untuk mencapai tujuan studi. Kerangka studi berfungsi sebagai acuan proses pengambilan literatur agar penulisan studi berjalan sistematis. Selain itu, kerangka studi memudahkan pembaca dalam memahami studi yang akan dilakukan. Berdasarkan ide yang telah dibuat, dapat dilihat kerangka studi yang disusun dalam Gambar 2.1



↓

A

↓

Rumusan Masalah

1. Bagaimana mekanisme dan teknologi proses stabilisasi solidifikasi?
2. Bagaimana keunggulan dan kelemahan aplikasi teknologi stabilisasi/solidifikasi dalam remediasi tanah tercemar limbah B3?
3. Apa sajakah kasus-kasus pencemaran tanah yang berhasil ditangani dengan stabilisasi/solidifikasi?
4. Bagaimana aplikasi metode stabilisasi/solidifikasi untuk penanganan tanah tercemar limbah B3 di Indonesia?

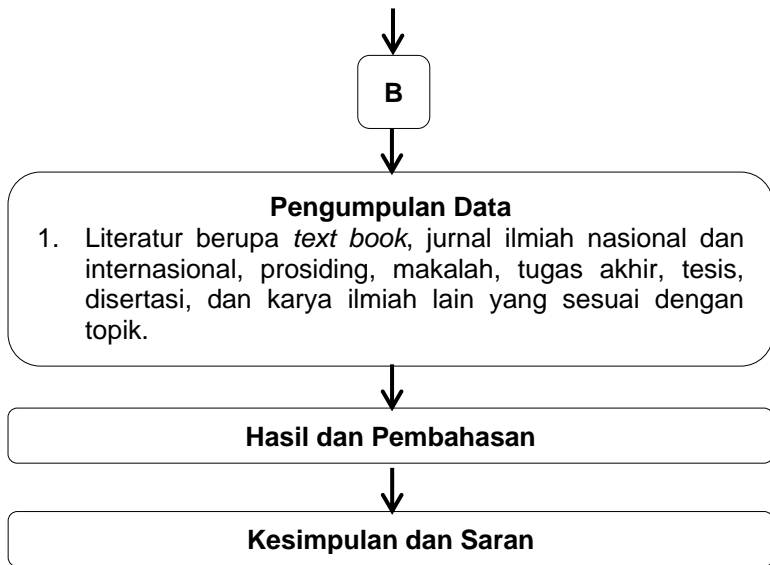


Tujuan

1. Mengidentifikasi teknologi dan mekanisme stabilisasi/solidifikasi
2. Mengkaji keunggulan dan kelemahan aplikasi proses stabilisasi/solidifikasi dalam remediasi tanah tercemar limbah B3.
3. Membahas kasus pencemaran tanah yang berhasil ditangani dengan stabilisasi/solidifikasi.
4. Membahas aplikasi metode stabilisasi/solidifikasi untuk penanganan tanah tercemar limbah B3 di Indonesia.



B



Gambar 2. 1 Kerangka Studi

2.2 Metode Studi

Metode studi berisi rangkaian langkah studi yang akan dilakukan hingga mendapatkan kesimpulan. Metode studi dibuat agar pelaksanaan studi terarah dan dapat mencapai tujuan.

2.2.1 Ide Studi

Ide studi dalam tugas akhir ini adalah “Kajian Aplikasi Teknologi Stabilisasi/Solidifikasi untuk Remediasi Tanah Tercemar Limbah B3”. Studi ini diperoleh melalui kondisi eksisting dimana pencemaran tanah oleh limbah B3 beracun akibat kegiatan industri dan pertambangan sering terjadi namun banyak yang belum teratasi. Sehingga diperlukan solusi dari kondisi eksisting yang ada.

2.2.2 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan untuk menyusun tugas akhir ini didapatkan dari berbagai sumber pustaka. Sumber pustaka yang digunakan berasal dari *text book*, peraturan perundangan yang

sesuai terhadap ide studi, jurnal ilmiah nasional dan internasional, makalah, tugas akhir, tesis, disertasi, dan karya ilmiah lain yang berhubungan dengan topik yang dibahas.

Jurnal ilmiah didapatkan dari mengakses situs penyedia jurnal ilmiah diinternet dengan cara memasukkan kata kunci yang berkaitan dengan topik kajian pustaka. Jurnal yang digunakan diutamakan adalah jurnal ilmiah dengan tahun publikasi 10 tahun terakhir.

2.2.3 Hasil dan Pembahasan

Untuk memudahkan penyusunan tugas akhir ini, diperlukan *outline* studi literatur. Berikut merupakan *outline* studi literatur tugas akhir ini:

BAB 1 Pendahuluan

- 1.1 Latar Belakang
- 1.2 Rumusan Masalah
- 1.3 Tujuan Penelitian
- 1.4 Manfaat
- 1.5 Ruang Lingkup

BAB 2 Metode Studi

- 2.1 Kerangka Studi
- 2.2 Metode Studi
 - 2.2.1 Ide Studi
 - 2.2.2 Pengumpulan Data
 - 2.2.3 Hasil dan Pembahasan
 - 2.2.4 Kesimpulan dan Saran

BAB 3 Hasil Studi

- 3.1 Teori Stabilisasi/Solidifikasi
 - 3.1.1 Definisi
 - 3.1.2 Tujuan
 - 3.1.3 Uji Produk Stabilisasi/Solidifikasi
- 3.2 Mekanisme dan Teknologi Stabilisasi/Solidifikasi
 - 3.2.1 Mekanisme dan Teknologi
 - 3.2.1.1 Kapsulasi Makro
 - 3.2.1.2 Kapsulasi Mikro
 - 3.2.1.3 Kapsulasi Termoplastik

- 3.2.1.4 Absorpsi
- 3.2.1.5 Adsorpsi
- 3.2.1.6 Vitrifikasi
- 3.2.2 Bahan Pengikat dan Penerapan S/S
 - 3.2.2.1 Bahan Pengikat Alami
 - 3.2.2.2 Bahan Pengikat Buatan
 - 3.2.2.3 Penerapan S/S secara *In Situ*
 - 3.2.2.4 Penerapan S/S secara *Ex Situ*
- 3.3 Keunggulan dan Kelemahan Aplikasi Proses Stabilisasi/Solidifikasi
 - 3.3.1 Aplikasi pada Pencemar Organik
 - 3.3.2 Aplikasi pada Pencemar Anorganik

BAB 4 Pembahasan Studi Kasus

- 4.1 Kasus Aplikasi S/S yang Berhasil Diterapkan
- 4.2 Kasus Pencemaran Logam Berat di Sungai Lembang, Malaysia
- 4.3 Kasus Pencemaran Merkuri di Kulon Progo, Indonesia
- 4.4 Ulasan Penanganan Tanah Tercemar Limbah B3 di Lokasi Studi Kasus

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

- 5.1 Kesimpulan
- 5.2 Saran

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses stabilisasi/solidifikasi yang akan dibahas adalah:

- Jenis pencemar
- Jenis *binder* dan zat aditif
- Komposisi optimum bahan pengikat

Studi Kasus yang dibahas pada bab 4 adalah kasus pencemaran tanah yang berhasil diatasi dengan S/S dan belum berhasil diatasi dengan S/S. Subbab 4.1 membahas studi kasus pencemaran tanah yang terjadi di negara maju dan berhasil diremediasi menggunakan S/S. Data yang dibutuhkan didapatkan dari jurnal ilmiah internasional, *project report* kasus terkait, dan referensi ilmiah lain yang berkaitan dengan studi kasus. Subbab 4.2 dan 4.3 membahas studi kasus pencemaran tanah di Malaysia dan Indonesia sebagai negara berkembang yang belum

menemukan penyelesaian atas masalah pencemaran tanah yang terjadi. Oleh karena itu pada subbab 4.4 akan dibahas rekomendasi solusi dengan berdasarkan pada informasi dari hasil analisa pada studi literatur sehingga dapat diketahui teknologi S/S yang tepat untuk diterapkan di lokasi studi kasus. Aspek-aspek yang akan diperhatikan pada studi kasus ini adalah:

- Aspek Teknologi
- Aspek Lingkungan
- Aspek Regulasi

Hal-hal yang akan dibahas pada studi kasus adalah:

- Jenis bahan pengikat untuk S/S
- Peraturan perundangan yang berlaku
- Hasil penelitian terdahulu

2.2.4 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan merupakan jawaban dari studi literatur yang didapatkan dari hasil dan pembahasan. Saran berisi hal-hal yang masih dapat dikerjakan dengan baik dan dikembangkan lebih lanjut.

BAB 3

HASIL STUDI

3.1 Teori Stabilisasi/Solidifikasi

Stabilisasi/solidifikasi (S/S) merupakan proses yang melibatkan pencampuran limbah dengan zat pengikat untuk mereduksi pelindian kontaminan baik secara fisik dan kimia. Proses S/S mengkonversi limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) menjadi bentuk limbah yang dapat diterima oleh lingkungan untuk dibuang ke lahan pembuangan atau digunakan untuk keperluan konstruksi. S/S telah banyak digunakan untuk menangani limbah radioaktif tingkat rendah, berbahaya, dan limbah campuran (Spence dan Shi, 2005).

3.1.1 Definisi Stabilisasi/Solidifikasi

“Stabilisasi” adalah proses penambahan bahan aditif atau reagensia yang bertujuan untuk mengurangi sifat beracun limbah, dengan cara mengubah limbah dan komponen berbahayanya ke bentuk yang dapat mengurangi laju migrasi kontaminan ke lingkungan, atau mengurangi sifat beracun limbah tersebut. Sedangkan “solidifikasi” adalah proses ditamhakkannya bahan yang dapat memadatkan limbah agar terbentuk massa limbah yang padat (Trihadiningrum, 2016).

Solidifikasi dan stabilisasi dapat dicapai dengan reaksi kimia antara limbah dan reagen pematat atau dengan proses mekanis. Migrasi kontaminan biasanya dibatasi dengan mengurangi luas permukaan yang terkena pelindian atau dengan melapisi limbah dengan material yang memiliki permeabilitas rendah (Spence dan Shi, 2005).

Bahan pengikat kontaminan dalam limbah yang sering digunakan adalah pozzolan. Pozzolan adalah bahan alam atau buatan yang sebagian besar kandungannya terdiri atas unsur-unsur silika dan alumina atau keduanya (Wiqoyah, 2007).

3.1.2 Tujuan Stabilisasi/Solidifikasi

Tujuan dari proses stabilisasi/solidifikasi adalah mengkonversi limbah beracun menjadi massa yang secara fisik inert, memiliki daya *leaching* rendah, serta kekuatan mekanik yang cukup agar aman untuk dibuang ke *landfill* limbah B3

(Trihadiningrum, 2016). *Leaching* atau pelindian adalah proses dimana kontaminan ditransfer dari matriks yang stabil menjadi sebuah zat cair seperti air (LaGrega *et al.*, 2001).

Menurut Trihadiningrum (2016), produk stabilisasi diharapkan memiliki karakteristik sebagai berikut:

- 1) Stabil.
- 2) Mampu menahan beban.
- 3) Toleran terhadap kondisi basah dan kering yang silih berganti.
- 4) Permeabilitas rendah.
- 5) Tidak menghasilkan lindi yang berkualitas buruk.

Teknik remediasi menggunakan proses S/S menurut Paria dan Yuet (2006) memiliki beberapa keuntungan antara lain:

- 1) Kemudahan dalam penerapan dan pengolahannya.
- 2) Mempunyai stabilitas fisik dan kimia jangka panjang yang baik.
- 3) Mempunyai kekuatan kompresi yang baik.
- 4) Resisten terhadap biodegradasi.
- 5) Memiliki permeabilitas air yang rendah.

Proses stabilisasi biasa digunakan untuk:

- 1) Stabilisasi limbah cair B3 sebelum dibuang ke *landfill*.
- 2) Remediasi lahan-lahan yang terkontaminasi limbah B3.

Prosedur stabilisasi/solidifikasi adalah sebagai berikut:

- 1) Sebelum dilakukan stabilisasi/solidifikasi, limbah B3 harus ditentukan karakteristiknya terlebih dahulu guna menentukan komposisi bahan-bahan yang perlu ditambahkan.
- 2) Setelah dilakukan stabilisasi/solidifikasi, selanjutnya dilakukan uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) terhadap hasil olahan tersebut untuk mengukur konsentrasi parameter dalam lindi (*extract/eluate*); hasil uji TCLP sebagaimana dimaksud, kadarnya tidak boleh melewati nilai baku mutu.
- 3) Hasil stabilisasi selanjutnya diuji kuat tekan (*compressive strength*); nilai tekanan minimum sebesar 10 ton/m², dan lolos uji *paint filter test*.
- 4) Hasil stabilisasi yang memenuhi persyaratan baku mutu TCLP, nilai uji kuat tekan dan paint filter test harus ditimbun di tempat penimbunan (*landfill*) B3.

3.1.3 Uji Produk Stabilisasi/Solidifikasi

Uji produk S/S merupakan uji yang diperlukan untuk mengetahui efektifitas dari proses S/S. Pengujian dilakukan untuk menentukan kekuatan produk S/S dan daya pelindian dari kontaminan yang terkandung di dalam produk.

3.1.3.1 Uji Ekstraksi dan Pelindian (*Leaching*)

Stabilisasi/solidifikasi mampu mengurangi laju migrasi kontaminan dalam limbah. Namun infiltrasi air hujan pada limbah yang sudah distabilisasi dapat memungkinkan migrasi kontaminan dalam limbah menuju lingkungan dalam wujud cair. Peristiwa migrasi kontaminan dari matriks yang stabil menjadi sebuah zat cair disebut pelindian atau *leaching*. Beberapa metode uji pelindian dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Jenis-Jenis Metode Uji Pelindian

Jenis Metode Pelindian
<i>Paint filter test</i>
<i>Liquid release test</i>
<i>Extraction procedure toxicity test (EPTox)</i>
<i>Synthetic precipitation leaching procedure (SPLP)</i>
<i>Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)</i>
<i>Modified uniform leach procedure (ANS 16.1)</i>
<i>Equilibrium leach test</i>
<i>Dynamic leach test</i>
<i>Sequential leach test (sequential chemical extraction)</i>
<i>Multiple extraction procedure</i>

Sumber: LaGrega *et al.*, 2001

a. *Paint Filter Test*

Paint filter test digunakan untuk menentukan adanya cairan bebas dari setiap sampel limbah (US EPA, 2004). Sampel yang akan diuji diletakkan pada alat *paint filter*. Sampel dinyatakan mengandung *free liquid* (cairan bebas) apabila ada bagian dari sampel yang turun melewati *paint filter* dalam durasi 5 menit. Sampel yang dinyatakan mengandung cairan bebas harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke *landfill*. Namun *paint filter test* tidak memadai untuk mengevaluasi keefektifan teknologi S/S yang

diaplikasikan untuk remediasi tanah. Metode yang sesuai untuk menguji produk teknologi S/S yang diaplikasikan untuk remediasi tanah adalah *liquid release test*.

Sebanyak 100 mL atau 100 g sampel yang representatif dibutuhkan pada uji ini. Bila tidak memungkinkan untuk mendapatkan sampel limbah yang representatif dengan hanya mengambil sebanyak 100 mL atau 100 g sampel, maka dapat digunakan sampel yang berukuran lebih besar dengan kelipatan 100 mL atau 100 g. Namun saat sampel yang lebih besar digunakan, analisis harus membagi sampel menjadi beberapa bagian berukuran 100 mL atau 100 g. Pengujian dilakukan terhadap setiap bagian secara terpisah. Bila salah satu bagian mengandung cairan bebas, maka seluruh sampel dinyatakan mempunyai cairan bebas. Bila sampel diukur secara volumetrik, maka sampel harus sebisa mungkin tidak memiliki ruang udara yang besar atau rongga.

Alat dan bahan yang digunakan diantaranya:

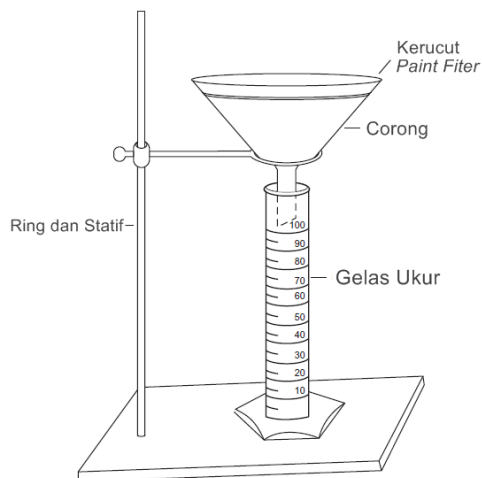
- 1) Kerucut *paint filter* dengan ukuran *mesh* $60 \pm 5\%$.
- 2) Gelas corong
- 3) *Ring* dan statif, atau tripod
- 4) Gelas ukur ukuran 100 mL.

Prosedur pengujian:

- 1) Pasang alat uji seperti pada gambar 3.1
- 2) Letakkan sampel pada penyaring. Corong dapat digunakan untuk menyangga *paint filter*. Mengendapkan sampel ke dalam *paint filter* dapat dibantu dengan mengetuk sisi filter ketika filter sudah terisi.
- 3) Untuk memastikan keseragaman dan standarisasi uji, bahan seperti bantalan sorben yang tidak sesuai dengan bentuk *paint filter* harus dipotong menjadi bagian-bagian kecil dan dituangkan ke dalam filter. Pengurangan ukuran sampel lebih baik dilakukan dengan cara memotong bahan sorben dengan gunting, pisau, atau alat lain yang dapat mempertahankan sebanyak mungkin keutuhan asli sorben. Sorben yang tertutup kain harus dicampur dengan potongan-potongan kain yang dihasilkan. Partikel

yang diuji harus dikurangi ukurannya hingga lebih kecil dari 1 cm (harus mampu melewati saringan standar berukuran 9.5 mm). Menggiling bahan sorben harus dihindari karena dapat merusak keutuhan sorben dan menimbulkan banyak “partikel halus” yang tidak seharusnya ada.

- 4) Untuk bahan rapuh yang berukuran lebih besar dari 1 cm dan tidak sesuai dengan filter, penghancuran dengan menggunakan cahaya untuk mengurangi ukuran partikel berukuran besar diperbolehkan bila tidak praktis untuk memotong bahan. Bahan seperti lempung, silika gel dan beberapa polimer termasuk dalam kategori ini.
- 5) Biarkan sampel untuk mengalir selama 5 menit ke gelas ukur.
- 6) Bila ada bagian dari bahan uji yang terkumpul pada gelas ukur dalam kurun waktu 5 menit, maka bahan tersebut dianggap mengandung cairan bebas.



Gambar 3. 1 Alat Uji *Paint Filter Test*
Sumber: US EPA, 2004

b. *Liquid Release Test*

Liquid release test bertujuan untuk menentukan terlepas atau tidaknya cairan dari sorben saat produk stabilisasi mengalami beban tekanan tertentu pada *landfill*. Segala benda uji mengandung cairan yang tidak lolos uji *paint filter test* dapat diasumsikan melepaskan cairan pada uji ini. Dalam prosedur pengujian, benda uji diberi beban tekanan tertentu untuk menentukan banyaknya lindi yang dapat terperas keluar.

Sampel yang representatif dari sorben yang mengandung cairan, diletakkan setinggi 10 cm pada alat uji. Sampel diletakkan diantara saringan *stainless-steel* kembar dan dua jala *stainless-steel* pada alat uji yang mampu mensimulasikan tekanan pada *landfill*. Kertas saring yang memiliki kemampuan absorpsi diletakkan di samping setiap jala *stainless-steel* dan berlawanan dengan posisi sampel. Gaya tekan sebesar 50 psi (6894,74 pascal) diterapkan pada bagian atas sampel. Lepasnya cairan terindikasi apabila terdapat titik basah yang dapat diamati pada kedua kertas saring.

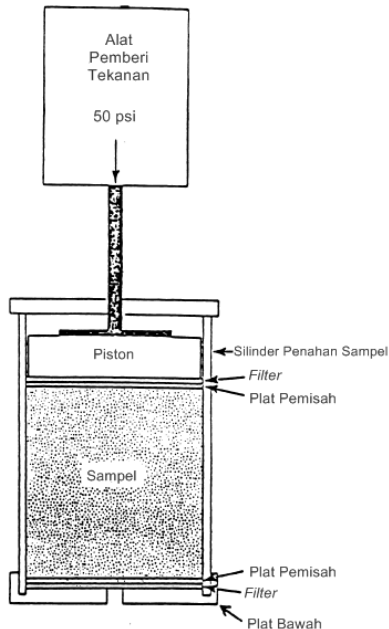
Alat yang digunakan untuk uji ini diantaranya:

- Alat uji *Liquid Release Test*: Alat yang mampu menerapkan tekanan sebesar 50 psi secara kontinyu pada bagian atas sampel uji yang berbentuk silinder. Tekanan tersebut diaplikasikan dengan menggunakan piston yang ada pada bagian atas sampel. Semua komponen yang mengalami kontak langsung dengan sampel (penahan sampel, saringan, dan piston) harus tahan terhadap serangan dari benda uji. Penahan sampel merupakan dinding kaku berbentuk silinder dengan pelat dibagian bawah yang mampu menahan sampel dengan diameter 76 mm dan tinggi 10 cm. Alat tekan berupa tongkat bertekanan yang mendorong piston yang terletak langsung di atas sampel. Tongkat dapat menekan piston dengan tekanan yang dapat diatur dengan menggunakan tekanan pneumatik, mekanik, atau hidrolik.

- Saringan *stainless-steel*: Saringan yang berfungsi untuk memisahkan sampel dari filter, sehingga mencegah hasil positif yang salah dari partikel yang jatuh pada kertas saring. Terdapat dua diameter saringan yang digunakan, yaitu saringan dengan diameter 90 mm yang diletakkan dibawah sampel dan diameter 76 mm yang diletakkan di atas sampel pada silinder penahan sampel
- Jala *stainless-steel*: Berfungsi untuk menyediakan gap udara antara saringan *stainless-steel* dan kertas saring. Kawat *stainless-steel* dipotong menjadi dua yaitu ukuran diameter 90 mm dan 76 mm.
- Kertas saring: Untuk mendeteksi cairan yang terlepas. Terdiri dari dua ukuran yaitu diameter 90 mm dan 76 mm.
- Spatula: Untuk membantu memindahkan sampel.
- Palu karet atau kayu: Untuk mengetuk sisi alat uji untuk meratakan sampel.

c. *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP)

Uji TCLP menurut Peraturan Pemerintah RI No. 101 Tahun 2014 adalah prosedur laboratorium untuk memprediksi potensi pelindian B3 dari suatu limbah. Uji berfungsi untuk memastikan produk yang telah melalui proses S/S tidak mencemari bila dibuang ke lingkungan. Uji TCLP adalah uji *batch*-ekstraksi. Produk S/S akan dihancurkan menjadi ukuran partikel yang lebih kecil dari 9,5 mm. Selanjutnya dicampur dengan larutan asam asetat dengan pH 2,88 + 0,05 pada rasio berat larutan:padatan 20:1. Selanjutnya campuran diagitasi selama 18 jam dengan laju 30 rpm pada suhu 22°C. Ekstrak disaring dengan filter *fiberglass* berukuran 0,6-0,8 μm .



Gambar 3. 2 Alat Uji *Liquid Release Test*
Sumber: US EPA, 1994

Metode ini dapat digunakan untuk pengujian limbah B3 dengan kandungan berbagai kontaminan organik maupun anorganik. Hasil pengujian kadar kontaminan dibandingkan dengan baku mutu uji TCLP guna menentukan sifat berbahaya/tidaknya limbah yang diuji (Trihadiningrum, 2016).

Alat yang digunakan untuk uji ini diantaranya:

- Alat agitasi: Alat agitasi harus mampu memutar bejana ekstraksi pada kecepatan 30 rpm.
- Bejana ekstraksi
- Alat filtrasi
- Penyaring (*filter*): *Filter* harus dibuat dari gelas fiber borosilikat, harus tidak mengandung zat pengikat, dan harus mempunyai ukuran pori efektif sebesar 0,6 hingga 0,8 μm , atau setara.

- pH meter: pH meter harus mempunyai akurasi hingga + 0,05.
- Neraca analitik dengan akurasi +0,01 gram.
- Gelas beaker atau labu erlenmeyer ukuran 500 mL.
- *Watchglass* dengan ukuran diameter yang mampu menutupi gelas beaker atau labu erlenmeyer.
- Pengaduk magnetik.

3.1.3.2 Uji Fisik

Uji fisik bertujuan untuk mengevaluasi sifat fisik dan sifat teknis (kekuatan, kompresibilitas, dan permeabilitas) dari limbah yang sudah distabilisasi. Jenis-jenis uji fisik telah dirangkum pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Jenis-Jenis Uji Fisik

Jenis Uji	Tujuan
Sifat fisik	
Kadar air	Perhitungan fase (kejenuhan)
Berat jenis	Perhitungan tekanan dan volume
<i>Specific gravity</i>	Perhitungan fase
Distribusi ukuran partikel	Klasifikasi partikel
<i>Pocket penetrometer</i>	Penentuan kekuatan campuran dalam proses stabilisasi
Uji mikrostruktur dengan: Sinar X Mikroskop Optik <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	Penentuan karakteristik Kristal atau partikel
Pembentukan supernatant selama masa <i>curing</i>	Waktu <i>curing</i>
Laju <i>setting</i>	Kelebihan cairan dalam campuran
Sifat Teknis	
Kekuatan	Analisis kestabilan
Kompresibilitas	Analisis <i>settlement</i>
Konduktifitas hidrolis	Perhitungan aliran transport
Sifat Daya Tahan	
Basah/kering	Penentuan ketahanan jangka panjang
Beku/dingin	Penentuan ketahanan jangka panjang

Sumber: LaGrega *et al.*, 2001

a. Uji Kadar Air

Uji kadar air digunakan untuk menentukan banyaknya air yang terkandung dalam limbah dengan jumlah tertentu. Pada limbah yang sudah disolidifikasi, kadar air dibutuhkan untuk menghitung berat kering limbah.

Kadar air ditentukan dengan mengeringkan sampel limbah pada suhu 105°C selama 24 jam. Kadar air dihitung berdasarkan selisih berat antara berat basah dan berat kering, dibagi dengan berat basah limbah dan dinyatakan dalam %.

b. Berat Jenis

Peningkatan volume limbah akibat proses stabilisasi dapat dihitung dengan berat jenis limbah yang menyatakan hubungan berat-volume. Data tersebut digunakan untuk menentukan kebutuhan ruang untuk pembuangan akhir.

Berat jenis limbah ditentukan dengan menghitung dan menimbang sampel yang sudah distabilisasi. Berat jenis adalah berat sampel per satuan volume (g/cm^3). Berat jenis dapat dinyatakan untuk sampel basah atau sampel kering.

c. *Specific Gravity*

Specific gravity adalah berat jenis sampel dibagi dengan berat jenis air. Dalam satuan SI, *specific gravity* bernilai sama dengan berat jenis karena berat jenis air adalah $1,0 \text{ g/cm}^3$.

3.2 Mekanisme dan Teknologi Stabilisasi/Solidifikasi

3.2.1. Mekanisme dan Teknologi

Menurut Spence dan Shi (2005) teknologi S/S terbagi atas S/S secara fisik, kimia, dan termal. S/S secara fisik adalah proses S/S yang tidak melibatkan reaksi kimia. Proses dapat berlangsung dengan adsorpsi atau absorpsi suatu zat pada permukaan atau pori-pori, atau mengkapsulasi limbah pada matriks pembungkus. Teknologi ini memisahkan zat berbahaya dari lingkungan secara fisik. Contoh S/S secara fisik adalah kapsulasi makro, kapsulasi mikro, dan kapsulasi termoplastik.

S/S secara kimia adalah proses S/S yang memerlukan reaksi kimia untuk memungkinkan proses S/S berlangsung. Sebagian besar proses S/S secara kimia melibatkan reaksi bahan semen atau pozzolan yang sangat kompleks.

S/S secara termal adalah proses S/S yang menggunakan panas untuk melelehkan dan mensolidifikasi senyawa berbahaya pada massa yang solid seperti bahan-bahan yang mempunyai sifat menyerupai gelas. S/S secara termal juga disebut vitrifikasi.

Banyaknya jenis limbah menyebabkan berkembangnya teknologi dasar stabilisasi untuk mengolah limbah B3. Beberapa teknologi yang baik diterapkan untuk mengolah limbah B3 diantaranya:

- Kapsulasi Makro
- Kapsulasi Mikro
- Kapsulasi Termoplastik
- Absorpsi
- Adsorpsi
- Vitrifikasi

3.2.1.1 Kapsulasi Makro

Kapsulasi makro didefinisikan dengan pembungkusan limbah B3 dalam kapsul pembungkus yang inert & kedap air. Bahan pembungkus dapat berupa campuran *fiberglass*, resin epoksida, dan resin *polyurethane* (Trihadiningrum, 2016). Limbah B3 tertahan dalam matriks yang terbentuk dari material stabilisasi (LaGrega *et al.*, 2001).

Gambar 3.3 contoh dari potongan-potongan limbah yang terstabilisasi sebagai hasil dari kapsulasi makro. Limbah-limbah tersebut mengandung logam, kayu, balok, bebatuan, dan plastik dengan berbagai bentuk dan ukuran. Beberapa limbah sudah dipotong dalam bentuk yang lebih kecil sehingga dapat dengan mudah dimasukkan ke drum berukuran 2 gal (7,57 Liter). Potongan-potongan limbah tersebut diikat dengan mencampurkan limbah dengan bubuk keramik fosfat yang sudah disiapkan. Bubur keramik fosfat disiapkan dengan cara mengaduk bubuk magnesium oksida terkalsinasi dan debu terbang (*fly ash*) dengan larutan asam fosfat (potassium fosfat) pada pengaduk berkapasitas 5 gal (18,93 Liter). Perbandingan dari campuran bubuk keramik adalah 40% debu, 40% *binder* (MgO dan bubuk KH_2PO_4 yang dicampur dengan perbandingan molar 1:1) dan 20% air. Setelah diaduk dengan kecepatan rendah (30-40 rpm) selama 30 menit, bubur keramik fosfat dituang ke

drum berisi limbah sambil diaduk terus-menerus agar campuran homogen (Singh *et al.*, 1998).

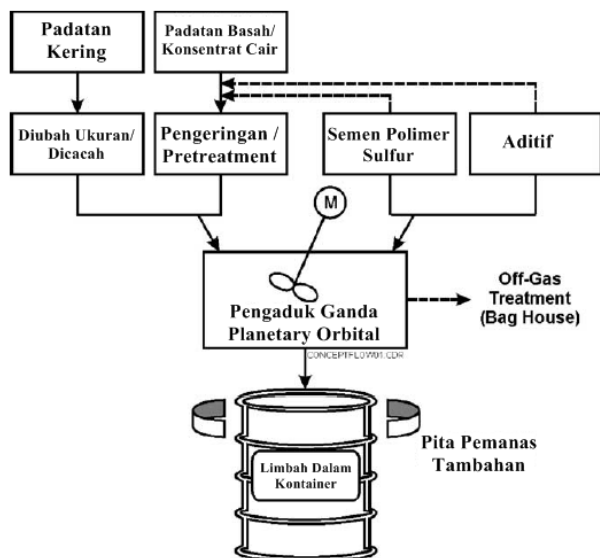


Gambar 3. 3 Kapsulasi Makro Potongan-Potongan Limbah Heterogen dengan Keramik Fosfat
Sumber : Singh *et al.*, 1998

3.2.1.2 Kapsulasi Mikro

Kapsulasi mikro melibatkan pengadukan antara limbah dan bahan pembungkus sebelum pemadatan terjadi (Randall dan Chattopadhyay, 2004). Limbah B3 terbungkus dalam struktur kristalin dari matriks tersolidifikasi pada level mikroskopis. Meskipun bahan yang terstabilisasi terdegradasi menjadi partikel berukuran kecil, sebagian besar limbah B3 yang terstabilisasi tetap terperangkap (LaGrega *et al.*, 2001).

Seringkali proses kapsulasi makro dan kapsulasi mikro dikombinasikan. Sebagai contoh Randall dan Chattopadhyay (2004) mengaplikasikan teknik kapsulasi pada limbah-limbah terkontaminasi logam berat merkuri. Limbah-limbah tersebut dikapsulasi dengan menggunakan polimer sulfur.



Gambar 3. 4 Stabilisasi/Solidifikasi dengan Polimer Sulfur
Sumber : Randall dan Chattopadhyay, 2004

Semen polimer sulfur yang telah dicairkan dituangkan di atas dan disekitar limbah hingga limbah berbentuk monolit. Untuk kapsulasi mikro unsur merkuri berwujud cair, dilakukan pencampuran dengan bubuk semen polimer sulfur dalam bejana reaksi yang dipanaskan pada suhu 40 °C. Zat aditif seperti sodium sulfida dan triisobutil fosfin sulfida dapat ditambahkan pada tahap ini. Selanjutnya semen polimer sulfur tambahan dituangkan pada campuran dan dipanaskan pada suhu 55 °C untuk membentuk campuran yang homogen. Keuntungan dari teknologi ini adalah

- Limbah dengan konsentrasi merkuri yang tinggi dapat diatasi dengan efektif.
- Proses menggunakan suhu yang relatif rendah (125-140 °C)
- Permeabilitas dan porositas rendah dibandingkan semen *portland*.
- Ketahanan tinggi terhadap lingkungan yang korosif.
- Kekuatan mekanis tinggi.

- f. Mudah untuk diimplementasikan karena alat pengadukan dan penuangan mudah tersedia.
- g. Lebih mudah digunakan dibanding termoplastik lain seperti *polyethylene*.
- h. Semen polimer sulfur dapat dilelehkan dan diformulasikan ulang.

Sedangkan kekurangan dari teknologi ini adalah:

- a. Kehilangan merkuri akibat penguapan dapat terjadi sehingga membutuhkan pengendalian.
- b. Limbah larutan harus dikeringkan sebelum pengolahan.
- c. Semen polimer sulfur dapat menimbulkan rongga udara yang berlebih bila didinginkan terlalu cepat.
- d. Potongan logam dengan massa termal yang besar membutuhkan pemanasan awal untuk mencegah terbentuknya rongga udara.
- e. Tidak kompatibel dengan larutan alkali kuat, agen oksidasi kuat, pelarut aromatik atau terklorinasi, atau jenis tanah liat.
- f. Penanganan semen polimer sulfur perlu penanganan teknis yang baik untuk mengurangi kemungkinan pengapian dan ledakan yang membahayakan.
- g. Bila temperatur yang berlebih terbentuk, semen polimer sulfur akan mengeluarkan gas hidrogen sulfida dan uap sulfur.

3.2.1.3 Kapsulasi Termoplastik

Kapsulasi polimer adalah teknologi pengolahan limbah dengan menggunakan polimer termoplastik untuk mensolidifikasi limbah B3 secara efektif dan aman. Umumnya polimer bersifat inert, mampu mengatasi beban limbah yang tinggi dibandingkan dengan enkapsulasi semen konvensional, dan mampu menciptakan karakteristik limbah yang rendah pelindian dan kuat tekan yang baik dalam waktu yang lama (Adams *et al.*, 2001).

Limbah yang akan diolah diayak terlebih dahulu hingga didapatkan ukuran partikel sebesar 0,3 – 0,07 mm. Kemudian limbah dicampurkan dengan polimer plastik dan diletakkan pada wadah tertutup dan diaduk dengan *screw extruder* pada kecepatan 50 rpm dan suhu 220 °C sehingga didapatkan matriks limbah yang homogen (Muniyandi *et al.*, 2014).

Jenis limbah yang sesuai untuk diolah dengan metode ini adalah limbah yang mengandung senyawa halida, limbah yang mengandung organik padat seperti resin, plastik, dan *tar*. Sedangkan untuk limbah B3 yang mengandung asam (memiliki pH rendah), perlu dinetralkan terlebih dahulu sebelum dicampur (US EPA, 1986).

Tabel 3. 3 Contoh Aplikasi Kapsulasi Termoplastik

No	Jenis Limbah	Bahan Pengikat	Sumber
1	Limbah B3 tercampur	LDPE (<i>low density polyethylene</i>) daur ulang 20 – 60 % dengan indeks leleh 22.	Adams <i>et al.</i> , 2001
2	Fraksi non metal dari PCB (printed circuit board)	HDPE (<i>high density polyethylene</i>) daur ulang 50% dan 6 phr (<i>part per hundred</i>) MAPE (<i>maleated polyethylene</i>)	Muniyandi <i>et al.</i> , 2014

3.2.1.4 Absorpsi

Limbah B3 dapat diikat secara fisik oleh bahan pengabsorpsi. Penggunaan bahan-bahan absorben dalam penanganan limbah B3 pada umumnya adalah untuk menyerap limbah yang bersifat cair agar lebih mudah ditangani. Oleh karena itu penggunaannya hanya bersifat temporer. Adapun bahan absorben yang bersifat pozzolanik atau dapat mengeras (misalnya abu terbang, lempung), dapat digunakan untuk jangka lebih lama (Trihadiningrum, 2016).

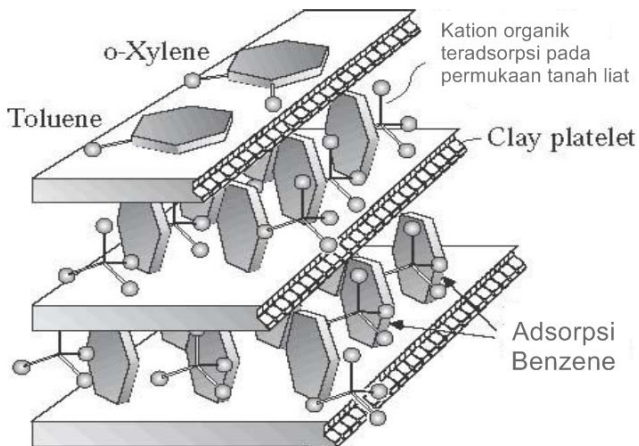
Menurut LaGrega *et al.* (2001), absorben yang paling umum digunakan diantaranya:

- Tanah
- Abu terbang (*Fly Ash*)
- Debu semen kiln (*Cement kiln dust*)
- Debu kapur kiln (*Lime kiln dust*)
- Mineral lempung termasuk bentonit, kaolinit, *vermiculite*, dan zeolit.
- Serbuk gergaji
- Jerami

3.2.1.5 Adsorpsi

Adsorpsi adalah fenomena dimana kontaminan secara elektrokimiawi terikat dengan agen stabilisasi dalam matriks. Ikatan ini terjadi melalui ikatan hidrogen. Kontaminan yang secara kimiawi teradsorpsi oleh matriks stabilisasi lebih sukar terlepas ke lingkungan dibandingkan kontaminan yang tidak teradsorpsi.

Stabilisasi limbah organik dengan tanah liat termodifikasi merupakan ilustrasi adsorpsi yang diterapkan pada limbah organik. Tanah liat termodifikasi diubah dengan mengganti kation anorganik yang dapat ditukar yang teradsorpsi pada permukaan tanah liat dengan kation rantai panjang. Sehingga tanah liat bersifat organofilik. Molekul limbah organik kemudian diadsorpsi ke tanah liat. Kekuatan ikatan penyerap harus diatasi bila molekul limbah organik terlepas ke lingkungan. Gambar 3.5 merupakan gambar limbah organik yang diadsorpsi pada tanah liat *organophilic*.



Gambar 3. 5 Limbah Organik yang Diadsorpsi pada Tanah Liat Termodifikasi.

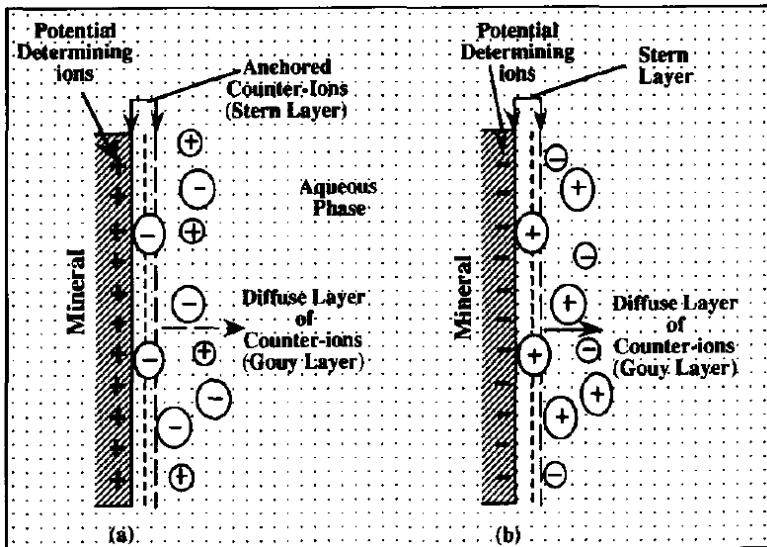
Sumber : LaGrega, 2001

Adsorpsi dari logam kationik oleh zat semen atau mineral lain maupun tanah lempung sangat tergantung pada:

- a. Karakteristik kimia pada permukaan.

- b. Lapisan ganda bermuatan pada antarmuka fase padat-cair.
- c. Densitas area adsorpsi.
- d. Komposisi dan pH media

Adsorpsi ion logam dapat menyebabkan interaksi kimia antara molekul di permukaan dan ion-ion yang teradsorpsi. Proses adsorpsi dimungkinkan secara fisik murni terjadi di alam. Gambar 3.6 menunjukkan bahwa bila sebuah ion diadsorpsi pada permukaan mineral (antarmuka padat-cair), maka sejumlah angka ekuivalen dari ion yang bersebrangan dengan permukaan harus juga diadsorpsi untuk menetralkan elektron dan membentuk "lapisan ganda bermuatan listrik".



Gambar 3. 6 Diagram Skematik dari Dua Lapisan Bermuatan Listrik pada Permukaan Mineral dalam Fase Air; (a) dan (b) mengacu pada permukaan positif dan negatif.

Sumber : Yousuf *et al.*, 1995

3.2.1.6 Vitrifikasi

Vitrifikasi adalah pengolahan termal yang mengubah limbah menjadi gelas atau bahan kristalin. Kebanyakan proses vitrifikasi

beroperasi pada suhu 1200°C atau lebih. Pada suhu ini, semua bahan organik dan beberapa bahan anorganik (seperti sianida, nitrat) telah hancur. Senyawa organik akan membentuk gas (seperti karbon dioksida, uap air, nitrogen oksida, sulfur) saat berinteraksi dengan senyawa organik lain dalam lelehan, atau dengan oksigen saat keluar dari proses.

Produk vitrifikasi tersusun dari tiga kelas oksida: zat pembentuk gelas, stabilisator, dan fluks. Zat pembentuk gelas yang utama adalah silika (SiO_2). Fluks mengurangi suhu leleh dan viskositas lelehan serta meningkatkan konduktivitas listriknya. Logam alkali oksida dan alkali tanah oksida adalah bahan utama fluks. Stabilisator meningkatkan durabilitas gelas. Stabilisator utamanya tersusun atas alkali tanah oksida dan alumina. Limbah yang mengandung timbal dan kromium juga masuk dalam pembentukan gelas dan menjadi bagian dari produk vitrifikasi yang menyerupai gelas.

Secara teknis vitrifikasi *in situ* dapat dijelaskan sebagai berikut. Arus listrik dialirkan ke dalam tanah, hingga menimbulkan panas. Akibatnya tanah akan mencair, menjadi massa lelehan yang bersifat lebih konduktif dan menjadi medium transfer panas yang terus mengembang. Gambar 3.6 menggambarkan vitrifikasi secara *in situ*.

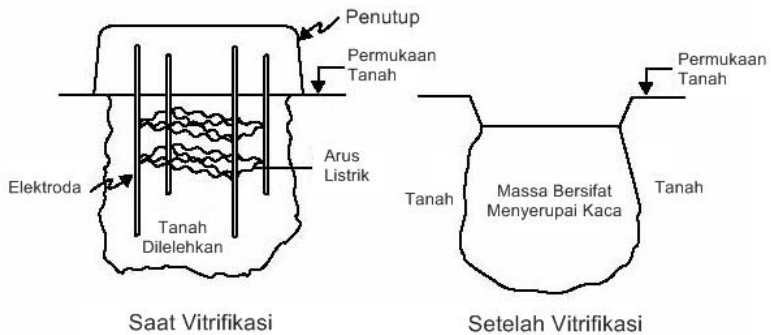
Teknologi vitrifikasi *in plant* pada dasarnya merupakan teknologi pembuatan gelas dengan penggunaan tungku yang dioperasikan pada suhu 1600°C. Sebagai *starter* digunakan campuran gelas daur ulang, abu terbang, dan kapur untuk memulai proses. Selanjutnya tanah yang terkontaminasi dikontakkan pada tungku untuk pelelehan dan peleburan selama 5 jam. Tanah yang memadat sebagai hasil vitrifikasi dapat dimanfaatkan sebagai bahan agregat untuk pembuatan jalan (Spence dan Shi, 2005 ; Trihadiningrum, 2016).

Menurut Castelo-Grande et al. (2003), keuntungan vitrifikasi adalah:

1. Vitrifikasi *ex situ* merupakan teknologi yang berkembang dengan baik.
2. Mobilitas kontaminan dikurangi / dihilangkan.
3. Massa yang sudah ter vitrifikasi mampu menahan pelindian untuk periode waktu geologis.

Sedangkan kerugian vitrifikasi adalah:

1. Proses membutuhkan energi yang intensif dan temperatur yang tinggi hingga mendekati 2000 K.
2. Air dalam tanah mempengaruhi operasi dan meningkatkan biaya total proses vitrifikasi.
3. Gas yang keluar harus dikumpulkan dan diolah sebelum dilepaskan.
4. Vitrifikasi *in situ* dalam pengembangan skala *pilot scale*.



Gambar 3. 7 Vitrifikasi secara *In Situ*
Sumber : Spence dan Shi, 2005

3.2.2. Bahan Pengikat dan Penerapan S/S

3.2.2.1 Bahan Pengikat Alami

a. Tanah Tras

Penggunaan tanah tras pada semen memiliki pengaruh yang penting dalam beberapa sifat pengerasan semen seperti kekuatan dan daya tahan (Akkas *et al.*, 2014). Menurut Palar (2013), tanah tras merupakan bahan pozzolan alam karena sebagian besar terdiri dari unsur-unsur silika dan atau aluminat yang reaktif. Tras sebagai lapukan batuan gunung berapi banyak mengandung silika yang dalam keadaan halus bila dicampur dengan kapur dan air akan membentuk massa yang padat, keras, dan tidak larut dalam air. Tras mengandung unsur silika dan alumina oksida namun hampir tidak mengandung kapur. Oleh karena itu tanah tras tidak mampu menyediakan sifat hidrolis karena

tidak adanya kapur terhidrasi. Oleh karena itu dibutuhkan tambahan kapur terhidrasi atau bahan yang mampu melepaskan kapur terhidrasi (seperti semen *portland*) untuk mengaktifkan tanah tras sebagai bahan pengikat (Alp *et al.*, 2009). Komposisi kimia tanah tras dapat dilihat pada Tabel 3.4

Tabel 3. 4 Komposisi Kimia Tanah Tras

No	Komposisi	Kandungan (%)			
		A	B	C	D
1	SiO ₂	46 – 59	71,80	68,32	69,29
2	Al ₂ O ₃	10 – 19	12,57	12,86	12,82
3	H ₂ O	3 - 12	-	-	-
4	Fe ₂ O ₃	4 – 12	0,40	2,07	2,12
5	CaO	1-7	1,68	2,33	2,71
6	MgO	1-6	0,38	1,51	0,73
7	Na ₂ O	3-10	1,88	1,59	1,62
8	K ₂ O	3-10	5,25	3,33	2,81
9	TiO ₂	-	0,27	-	-
10	P ₂ O ₅	-	-	0,06	0,06
11	SO ₃	-	-	0,07	0,08

Sumber : A = Palar, 2013

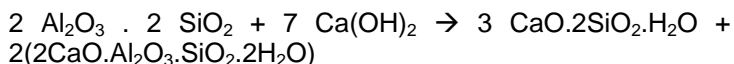
B = Yoleva *et al.*, 2011

C = Akkas *et al.*, 2014

D = Akkas *et al.*, 2014

Menurut Alp *et al.* (2009) tanah trass terdiri atas silika dan alumina oksida namun hamper tidak mengandung kapur. Oleh karena itu tanah trass tidak dapat memberikan sifat hidrolis karena tidak adanya kapur terhidrasi. Kapur terhidrasi atau bahan lain yang dapat terlepas saat hidrasi (seperti semen *portland*) perlu ditambahkan untuk mengaktivasi pozzolan alam sebagai bahan pengikat. Kalsium oksida sendiri berfungsi sebagai perekat atau pengikat yang menentukan kekuatan bahan pengikat (Wiryasa dan Sudarsana, 2009).

Reaksi pozzolanik saat dilakukan pencampuran antara tanah tras, semen dan air adalah:



b. Bentonit

Salah satu contoh pozzolan yang ada di alam adalah bentonit. Bentonit adalah *clay* yang sebagian besar terdiri dari mineral *montmorillonit*. Mineral *montmorillonit* merupakan bagian dari kelompok smektit dengan komposisi kimia secara umum $(\text{Mg,Ca})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Gonzalez *et al.*, 2008). Montmorillonit umumnya berukuran sangat halus yang apabila bersentuhan dengan air akan membuat ruang antar lapisan mineral mengembang sehingga dapat menyerap dan mengikat ion-ion logam dan senyawa organik. Ikatan bentonit dengan senyawa organik dapat membentuk kompleks organo-mineral. Menurut Stankovic *et al.* (2011), ada 2 tipe bentonit yaitu :

1. Na-bentonit: memiliki daya mengembang hingga delapan kali jika dicelupkan ke dalam air. Dalam kondisi kering berwarna putih sedangkan pada kondisi basah dan terkena sinar matahari akan berwarna mengkilap. Suspensi koloidal Na-bentonit memiliki rentang pH 8,5-9,8.
2. Ca-bentonit: kurang mengembang jika dicelupkan ke dalam air namun setelah diaktifkan akan secara alami memiliki sifat menyerap yang baik. Dalam keadaan kering berwarna abu-abu, kuning, merah, dan cokelat. Suspensi koloidal Ca-bentonit memiliki rentang pH 4-7.

Komposisi terbesar dari bentonit adalah SiO_2 . Komposisi lain pada bentonit dapat dilihat pada Tabel 3.5

Tabel 3. 5 Komposisi Kimia Bentonit

No.	Komposisi Kimia	Kandungan (%)		
		A	B	C
1	SiO_2	61,40	62,12	53,72
2	Al_2O_3	19,80	17,33	19,12
3	Fe_2O_3	3,90	5,30	4,93
4	CaO	0,60	3,68	5,28

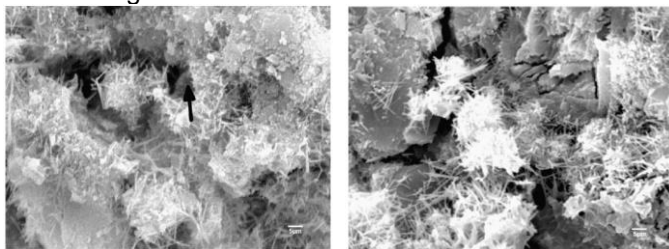
No.	Komposisi Kimia	Kandungan (%)		
		A	B	C
5	MgO	1,30	3,30	3,29
6	Na ₂ O	2,20	0,50	3,64
7	K ₂ O	0,40	0,55	-
8	H ₂ O	7,20	7,22	0,44
9	TiO ₂	-	-	0,85
10	Hilang Pijar	-	-	8,75

Keterangan :A = Na-bentonit (Stankovic *et al.*, 2011)

B = Ca-bentonit (Stankovic *et al.*, 2011)

C = Bentonit (Katsioti *et al.*, 2008)

Katsioti *et al.* (2008) menggunakan campuran semen dan bentonit untuk S/S limbah lumpur mengandung logam berat. Komposisi lumpur 50%, semen 30%, dan bentonit 20% menunjukkan hasil kuat tekan dan uji pelindian yang lebih baik dibandingkan dengan komposisi tanpa menggunakan bentonit. Hasil S/S tersebut dapat diaplikasikan untuk *landfill liner* atau bata balok bangunan.



Gambar 3. 8 Hasil Analisis SEM pada Sampel Dengan (a) Komposisi Lumpur/Semen dan (b) Komposisi Lumpur/Semen/Bentonit

Sumber: Katsioti *et al.*, 2008

Gambar 3.8 menunjukkan hasil analisis SEM (*Scanning Electron Microscopy*) pada produk S/S dengan campuran lumpur/semen dan lumpur/semen/bentonit. Dapat dilihat beberapa produk hidrasi yang dapat diidentifikasi, diantaranya *ettringite* (kristal menyerupai jarum), silikat hidrat (gumpalan menyerupai gel), dan kalsium hidroksida (kristal berserat). Anak

panah pada pada Gambar 3.8 (a) menunjukkan butiran lumpur yang hampir tidak bereaksi dengan produk hidrasi yang timbul di sekitar permukaan lumpur. Gambar 3.8 (b) menunjukkan penambahan bentonit meningkatkan proporsi kristal *ettringite* sehingga mampu meningkatkan kuat tekan dan imobilisasi kontaminan.

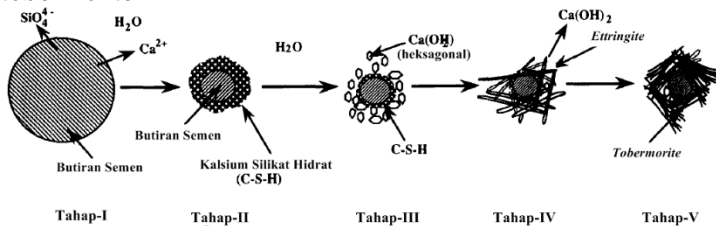
3.2.2.2 Bahan Pengikat Buatan

a. Semen *Portland*

Berdasarkan SNI 15-2049-2004 (BSN, 2004), semen *portland* adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen *portland* terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Berdasarkan jenis penggunaannya, semen *portland* dibagi menjadi 5 jenis, yaitu:

1. Semen *portland* jenis I: semen *portland* untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain. Nama lain dari semen *portland* ini adalah *Ordinary Portland Cement* (OPC).
2. Semen *portland* jenis II : semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang. Nama lain dari semen *portland* ini adalah *Moderat Heat Portland Cement*.
3. Semen *portland* jenis III : semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi. Nama lain dari semen *portland* ini adalah *High Early Portland Cement*.
4. Semen *portland* jenis IV : semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah. Nama lain dari semen *portland* ini adalah *Low Heat Portland Cement*.
5. Semen *portland* jenis V : semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat. Nama lain dari semen *portland* ini adalah *Sulfate Resistance Portland Cement*.

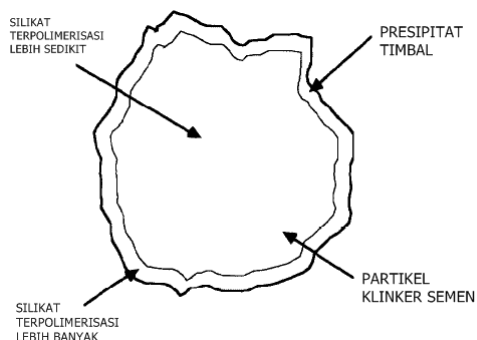
Menurut Yousuf *et al.* (1995), saat pencampuran semen dengan air, kalsium silikat terpisah menjadi silikat bermuatan dan ion-ion kalsium. Ion-ion silikat bermuatan ini bersatu membentuk lapisan tipis pada permukaan butiran semen untuk mencegah interaksi permukaan semen dengan air. Hal ini memperlambat terlepasnya ion-ion kalsium dan silikat dari semen menuju air. Proses hidrasi awal diikuti oleh nukleasi dan pertumbuhan kristal heksagonal dari kalsium hidroksida yang memenuhi ruang dan rongga antar butiran semen. Sementara itu, partikel kalsium silikat hidrat mengendap keluar dari air menuju lapisan yang kaya akan silikat pada butiran semen dan secara bertahap membentuk struktur menyerupai jarum. Struktur ini saling menciptakan kontak dengan butiran semen lain dan membentuk lembar *tobermorite*.



Gambar 3. 9 Model Kristal dari Hidrasi Semen

Sumber : Yousuf *et al.*, 1995

Cocke (1990) melakukan penelitian S/S terhadap logam berat Pb dan semen sebagai pozzolan. Pb dilapisi oleh lapisan kalsium silikat yang mencegah hidrasi dan menjebak larutan jenuh dalam kantung yang membatasi.



Gambar 3. 10 Sketsa Logam Berat Timbal yang Dilapisi Partikel Semen Pada Proses S/S
Sumber : Cocke, 1990

Menurut Utomo dan Laksono (2007), semen *portland* memiliki keuntungan untuk digunakan dalam proses S/S, diantaranya:

1. Mengandung komposisi yang konsisten
2. Reaksi setting, pengerasan, dan fiksasi berjalan lebih baik dibandingkan semen pozzolan lain.
3. Banyak penelitian tentang peluluhan logam menggunakan semen *portland* sehingga banyak acuan yang dapat digunakan.
4. Harganya relatif murah dan mudah untuk didapatkan.

Secara umum, komposisi kimia semen *portland* dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Komposisi Kimia Semen *Portland*

No.	Komposisi Senyawa	Kandungan (%)		
		A	B	C
1	CaO	38,0 – 67,0	65,0	64,32
2	SiO ₂	16,0 – 26,0	21,0	21,45
3	Al ₂ O ₃	4,0 – 8,0	6,00	4,30
4	Fe ₂ O ₃	2,0 – 5,0	3,50	3,28
5	MgO	1,0 – 5,0	0,70	1,18
6	Na ₂ O ₃	0,0 – 3,0	-	-
7	TiO ₂	0,0 – 0,5	-	-
8	Na ₂ O + K ₂ O	0,6 – 1,0	-	-
9	SO ₃	0,1 – 2,5	1,50	3,56

No.	Komposisi Senyawa	Kandungan (%)		
		A	B	C
10	P ₂ O ₅	0,0 – 1,5	-	-
11	Hilang pijar	0,5 – 3,0	4	2,055

Keterangan : A = Semen *portland* (Mursito, 2004)

B = *British Standard* untuk OPC (Ali *et al.*, 2008)

C = Holcim OPC (Ali *et al.*, 2008)

Secara sederhana, reaksi yang terjadi saat proses hidrasi semen adalah:



b. Abu Terbang (*Fly Ash*)

Menurut Rusyandi *et al.* (2012), *fly ash* adalah suatu hasil samping yang diperoleh dari pembakaran batubara di pusat-pusat tenaga listrik modern. *Fly ash* merupakan material berbentuk bubuk yang sangat halus, dimana komponen yang terbanyak adalah silika yang sebagian besar berbentuk butir-butir bulat. *Fly ash* terdiri dari silikon dioksida (SiO₂), alumunium oksida (Al₂O₃) dan besi oksida (Fe₂O₃) (Marzuki dan Jogaswara, 2007).

Menurut *American Standard Testing and Material* (ASTM) C618 (1994), *fly ash* terbagi menjadi dua kelas, yaitu :

1. *Fly ash* kelas F. *Fly ash* kelas ini diproduksi dari pembakaran batu bara antrasit dan bituminus. *Fly ash* ini terdiri atas bahan yang mengandung silika dan alumina, yang bila berada sendiri tidak mengandung nilai, tetapi dalam bentuk halus dan dengan adanya kelembaban, akan beraksi kimia dengan kalsium hidroksida pada temperature biasa untuk membentuk senyawa-senyawa yang bersifat semen.
2. *Fly ash* kelas C. *Fly ash* kelas ini diproduksi secara normal dan batu bara lignit dan sub-bituminus dan biasanya mengandung kalsium oksida (CaO) atau lumpur dalam jumlah signifikan. *Fly ash* kelas ini, disamping memiliki sifat pozzolan, juga memiliki sifat semen. Kandungan kapur dalam *fly ash* dapat terlihat dari sifat

fisik warnanya. Umumnya warna yang lebih muda mengindikasikan kandungan kalsium oksida (CaO) yang tinggi sedangkan warna yang lebih tua menunjukkan kandungan organik yang tinggi (Marzuki dan Jogaswara, 2007).

Kandungan kimia yang terdapat dalam kedua jenis *fly ash* tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.7. Pada tabel tersebut dapat terlihat jelas kandungan CaO yang dimiliki *fly ash* kelas C lebih tinggi daripada kelas F.

Tabel 3. 7 Kandungan Kimia *Fly Ash* Kelas C dan Kelas F

Jenis Kandungan	Berat Kandungan (%) (<i>Fly Ash</i> Kelas C)	Berat Kandungan(%) (<i>Fly Ash</i> Kelas F)
Kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (min)	50	70
Kandungan sulfur trioksida (SO_3), maks	5	5
CaO	>10	<10
Hilang pijar, maks	6	6

Sumber: ASTM C618, 1994

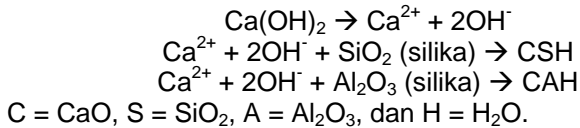
Tabel 3. 8 Komposisi Kimia *Fly Ash*

No	Komposisi Senyawa	Kandungan (%)
1	SiO_2	34,2
2	CaO	25,8
3	Al_2O_3	19,3
4	Fe_2O_3	5,64
5	MgO	5,07
6	Na_2O	2,04
7	K_2O	0,52
8	SO_3	2,2
9	Hilang pijar	0,11

Sumber: Dermatas dan Meng, 2003

Pembentukan zat-zat bersifat semen dengan reaksi dari CaO dan Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 saat adanya air disebut hidrasi.

Gel kalsium silikat hidrat dapat mengikat material yang inert. Untuk stabilisasi tanah dengan kapur, reaksi pozzolanik tergantung pada bahan yang mengandung silika dan alumina yang terdapat pada tanah.



c. Abu Sekam Padi

Menurut Putra (2006) abu sekam padi adalah limbah hasil pembakaran dari sekam padi yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran batu bata mentah, dalam proses pembuatan batu bata. Sekam padi atau kulit gabah merupakan limbah dari pabrik penggilingan padi dimana sekam merupakan bagian terbesar kedua setelah beras dan gabah. Pembakaran sekam pada proses pembuatan batu bata dapat mencapai suhu 600 – 700 °C dimana pada suhu tersebut akan dihasilkan SiO_2 yang reaktif yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan pozzolan buatan.

Bui *et al.* (2012) menggunakan tiga jenis abu sekam padi sebagai campuran semen. Ketiga jenis abu sekam padi tersebut diantaranya: abu sekam padi kristal parsial, abu sekam padi amorf, dan abu sekam padi kristalin. Abu sekam padi Kristal parsial adalah abu sekam padi yang merupakan residu dari pembakaran pellet sekam padi yang dibakar pada suhu 600 hingga 800 °C dengan ketel uap. Abu ini mengandung silika amorf dan Kristal silika parsial. Abu sekam padi amorf adalah residu pembakaran pellet sekam padi pada suhu 500 °C dengan kiln elektrik yang mengandung silika nonkristalin. Abu sekam padi kristalin adalah residu pembakaran pellet sekam padi pada suhu 900 °C dan mengandung padatan kristalin yang tinggi.

Bui *et al.* (2012), mengganti 20% semen dengan abu sekam padi sebagai campuran dalam bahan pengikat dengan perbandingan *air/binder* sebesar 0,37. Hasil penelitian menunjukkan campuran dengan menggunakan abu sekam padi amorf adalah campuran yang menghasilkan

produk dengan kekuatan paling besar. Adapun kandungan senyawa kimia abu sekam padi yaitu:

Tabel 3. 9 Komposisi Kimia Abu Sekam Padi

No	Komposisi	Kandungan (%)			
		A	B	C	D
1	SiO ₂	88,92	91,00	92,00	92,00
2	Fe ₂ O ₃	0,608	0,41	0,14	-
3	Al ₂ O ₃	0,674	0,35	0,25	0,37
4	CaO	-	0,98	0,81	1,05
5	MgO	-	0,81	1,05	0,95
6	SO ₃	-	1,21	0,96	1,06
7	P ₂ O ₅	-	0,98	0,99	0,93
8	Na ₂ O	-	0,08	-	-
9	K ₂ O	-	3,21	3,44	3,20

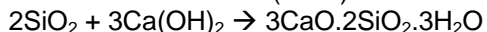
Keterangan : A = Abu sekam padi, (Putra, 2006)

B = Abu sekam padi kristal parsial, (Bui *et al*, 2012)

C = Abu sekam padi amorf, (Bui *et al*, 2012)

D = Abu sekam padi kristalin, (Bui *et al*, 2012)

Reaksi pozzolanik dari abu sekam padi membentuk kalsium silikat hidrat menurut Sivakumar (2009):



Tabel 3. 10 Contoh Aplikasi Berbagai Bahan Pengikat untuk S/S

No	Limbah	Bahan Pengikat	Sumber
1	Lumpur mengandung logam berat	Bentonit 20% + Semen 30%	Katsioti <i>et al.</i> , 2008
2	Lumpur kering dengan kadar organik tinggi (45,7%) dan kadar air 81,2%	Binder (perbandingan aluminat/semen = 4/6) 10%	Zhen <i>et al.</i> , 2012
3	Tanah terkontaminasi merkuri nitrat	<i>Thiol-functionalized zeolite</i> 5% (TFZ/limbah) dan semen <i>portland</i> 100% (semen/limbah)	Zhang <i>et al.</i> , 2009
4	Tanah terkontaminasi timbal	Semen : abu sekam padi (90:10 , 80: 20 , 70:30) Perbandingan binder:tanah tercemar = (0,5 ; 1,0 ; 2,0)	Yin <i>et al.</i> , 2006

3.2.2.3 Rasio Kimia Bahan Pengikat

Pada umumnya semen *portland* digunakan sebagai bahan pengikat untuk proses S/S (US EPA, 1999). Hal ini dikarenakan semen *portland* mengandung komposisi kimia yang konsisten dan menghasilkan produk S/S yang baik. Kandungan terbesar dalam semen adalah kandungan CaO yang memiliki fungsi dalam proses perekatan atau pengikatan, sedangkan SiO₂ berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*), dimana kedua bahan ini memiliki peranan dalam menentukan kekuatan semen. Al₂O₃ memiliki fungsi dalam mempercepat proses pengerasan (Wiryasa dan Sudarsana, 2009).

Penggunaan semen dalam jumlah yang banyak untuk digunakan sebagai bahan pengikat S/S membutuhkan biaya yang mahal. Mencampurkan semen dengan bahan pengikat lain baik buatan maupun alami menjadi alternatif untuk mengurangi konsumsi semen *portland* untuk S/S. Namun bahan pengikat selain semen seringkali tidak mengandung komposisi kimia yang berimbang untuk hidrasi yang dibutuhkan untuk mengikat kontaminan saat proses S/S berlangsung. Untuk itu perlu dihitung rasio CaO : SiO₂ : Al₂O₃ dalam setiap bahan pengikat. Kemudian dapat ditentukan bahan tambahan agar rasio kimia bahan pengikat lain setara dengan rasio kimia dari semen *portland* sebagai bahan pengikat terbaik.

Tabel 3. 11 Rasio Kimia CaO : SiO₂ : Al₂O₃ Setiap Bahan Pengikat

No	Bahan Pengikat	Kandungan dalam Bahan Pengikat (%)			Rasio CaO : SiO ₂ : Al ₂ O ₃	Penambahan
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
1	Semen <i>Portland</i>	65	21	6	11 : 4 : 1	-
2	Tanah Tras	2,33	68,32	12,86	0,2 : 5 : 1	Penambahan kapur
3	Bentonit	5,28	53,72	19,12	0,3 : 3 : 1	Penambahan kapur
4	<i>Fly Ash</i>	25,8	34,2	19,3	1,3 : 2 : 1	Penambahan kapur
5	Abu Sekam Padi	0,98	91,00	0,35	3 : 260 : 1	Penambahan kapur

Menurut Alp *et al.* (2009) meningkatnya kandungan Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O pada bahan pengikat dapat menurunkan daya ikat suatu bahan pengikat. Oleh karena itu pada Tabel 3.11 rasio Al_2O_3 dibuat bernilai 1. Agar tanah tras, bentonit, *fly ash*, dan abu sekam padi mampu mengimbangi kemampuan semen *portland* sebagai bahan pengikat, perlu ditambahkan kapur untuk meningkatkan kandungan CaO sebagai perekat dalam matriks semen.

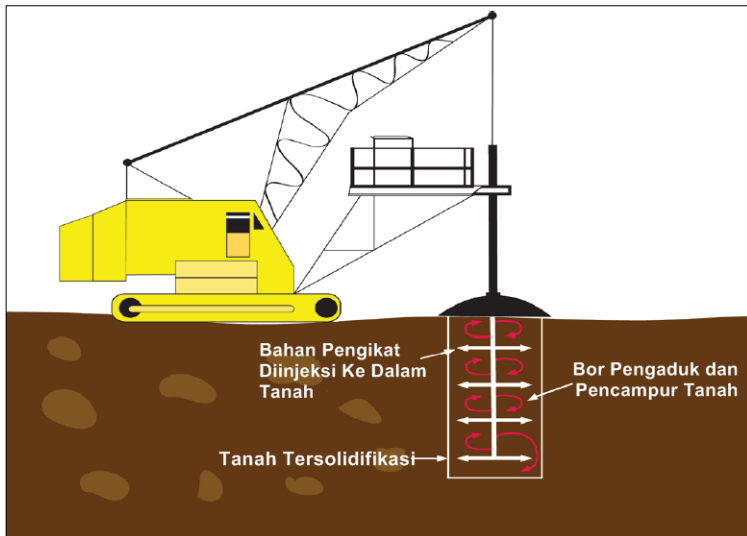
3.2.2.4 Penerapan S/S secara *In Situ*

A. Teknik Pencampuran

Teknik pencampuran *in situ* dilakukan untuk stabilisasi tanah yang tercemar. Teknik ini melibatkan alat berat sebagai penggali lubang dengan menggunakan *crane* dengan pengaduk yang besar atau bor. Alat berat yang digunakan mampu menginjeksi bahan aditif ke dalam tanah dan mengaduk bahan aditif bersamaan dengan kontaminan dalam tanah (US EPA, 2012). Menurut Trihadiningrum (2016), proses pencampuran berlangsung sempurna bila kriteria sebagai berikut telah tercapai:

1. Bahan yang distabilisasi telah memadat
2. Tidak terlihat terdapatnya cairan
3. Memungkinkan untuk menggali limbah tanpa terjadinya *overflow*
4. Rasio bahan aditif terhadap limbah sekitar 1:6

S/S secara *in situ* tidak membutuhkan tahap penggalian atau pemindahan. Teknik dan peralatan untuk S/S secara *in situ* sudah berkembang untuk menyediakan pengadukan yang baik. Bor atau sistem pengadukan dapat digunakan hingga kedalaman 25 meter. Keuntungan teknis dari S/S secara *in situ* adalah media yang terkontaminasi diolah ditempat. Daerah pengolahan *on-site* ataupun *off-site* yang terpisah tidak dibutuhkan. Tidak perlu mempertimbangkan pengangkutan logistik untuk pengolahan. Pengangkutan hanya dibutuhkan ketika pemindahan akhir dari material yang sudah diolah adalah *off-site*. Pencampuran dengan bor (*auger mixing*) adalah teknologi ang paling sering digunakan untuk pencampuran tanah secara *in situ* dan mampu digunakan pada kedalaman lebih besar dari 4,6 m.



Gambar 3. 11 Bahan Pengikat Dapat Diinjeksikan ke Tanah dan Diaduk Dengan Bor
Sumber : US EPA, 2012

Namun demikian, S/S *in situ* dengan cara tradisional kurang dapat menjamin imobilisasi pencemaran logam. Material terstabilisasi cenderung mempertahankan permukaan tanah awal dan permeabilitas terhadap air yang secara negatif dapat mempengaruhi daya tahan terhadap pelindian. Kerugian ini diperburuk saat material terstabilisasi terkena air laut yang mengandung senyawa agresif seperti klorida dan ion sulfat. Senyawa tersebut meningkatkan kemungkinan penurunan ketahanan tanah yang sudah diremediasi. Selain itu, ada banyak kendala dalam penerapan S/S secara *in situ*, diantaranya kelembaban berlebih, tanah yang tidak homogen, adanya puing-puing, dan kontaminasi dalam. Dengan demikian kendala aplikasi S/S secara *in situ* tampak lebih mudah dikontrol melalui pendekatan S/S secara *ex situ* (Scanferla *et al.*, 2009).

B. Peralatan

Peralatan pertama yang dibutuhkan untuk S/S secara *in situ* adalah bor dan alat pendukungnya. Terdapat dua tipe alat

pengeboran yang digunakan untuk pengolahan secara *in situ* dengan menggunakan bor, yaitu *crane-mounted unit* dan *excavator-mounted unit*. *Crane-mounted unit* terdiri dari alat bor putar yang didorong secara mekanis dan dipasang pada derek atau *crane*. *Excavator-mounted unit* terdiri dari bor putar yang terletak didasar ekskavator dan didorong secara hidrolis. *Crane-mounted unit* mampu menerima ukuran bor yang sedikit lebih besar yaitu 3 - 3,6 m dan secara teori memiliki kapabilitas untuk mengaduk tanah lebih dalam. *Excavator-mounted unit* lebih baik digunakan untuk diameter bor yang lebih kecil (2,8 – 3,1 m). *Excavator-mounted unit* memiliki panjang *stroke* yang terbatas dengan tinggi tiang pada peralatan (umumnya kurang dari 18,5 m). Namun *excavator-mounted unit* lebih menguntungkan untuk digunakan daripada *crane-mounted unit*, karena torsi operasi yang lebih tinggi dan biaya mobilisasi yang rendah.

Selanjutnya adalah peralatan *batch plant* yang terdiri dari silo, pompa, dan tangki pencampuran. Konfigurasi *batch plant* bervariasi, termasuk preferensi praktisi, jenis reagen dan kuantitas, jumlah reagen yang akan digunakan dan jarak pemompaan reagen, dan kendala terkait dengan lokasi remediasi.

Selain *batching plant*, berbagai peralatan pendukung tambahan diperlukan untuk keberhasilan S/S secara *in situ* berbasis pengadukan tanah dengan bor. Peralatan pendukung lain mencakup ekskavator, *dozer*, *loader*, *forklift*, *man-lifts*, sistem pemompaan, selang, peralatan survey dan *data logger*.



Gambar 3. 12 Bor dengan Tipe *Crane-mounted*
 Sumber : Bates dan Hills, 2015

C. Kapasitas Pengolahan

Umumnya, sistem berbasis bor mampu mengolah 153 – 460 m³ tanah atau lumpur setiap hari kerja. Namun, hal ini tergantung pada berbagai faktor termasuk sifat geoteknik tanah, kedalaman pengolahan maksimum dan dosis reagen. Pada tingkat produksi optimum, dengan kedalaman pengolahan 3 - 12 m dan diameter bor 2,5 – 3 m tidak umum untuk mengolah lebih dari 613 m³ per bor dalam jam kerja 8-10 jam. Namun, karena persyaratan pemeliharaan dan sesekali peralatan rusak, maka tingkat produksi rata-rata yang lebih rendah harus diantisipasi.



Gambar 3. 13 Bor dengan Tipe *Excavator-mounted*
Sumber : Bates dan Hills, 2015

D. Metode Penambahan Reagen S/S

Penambahan reagen S/S biasanya disediakan dengan cara dipompa / diinjeksi dengan menggunakan bor, atau dengan cara menambahkan reagen di atas permukaan tanah dan kemudian diaduk ke dalam tanah. Namun, menambahkan reagen di permukaan secara signifikan dibatasi oleh kedalaman pengolahan efektif yang dapat dicapai. Penambahan reagen melalui alat pengaduk mampu menyebarkan reagen dengan baik sehingga meningkatkan kualitas kontrol.



Gambar 3. 14 *Batch Plant*
Sumber : Bates dan Hills, 2015



Gambar 3. 15 Bor untuk Pengadukan Tanah pada S/S secara *In Situ*
Sumber : Bates dan Hills, 2015

3.2.2.5 Penerapan S/S secara *Ex Situ*

Stabilisasi/solidifikasi kontaminan *ex situ* secara fisik terikat atau tertutup dalam massa stabil (solidifikasi), atau reaksi kimia diinduksi antara agen stabilisasi dan kontaminan untuk mereduksi mobilitasnya. Namun S/S secara *ex situ* biasanya membutuhkan pembuangan bahan. Kelompok kontaminan yang menjadi sasaran S/S secara *ex situ* adalah kontaminan anorganik, termasuk radionuklida. Teknologi ini memiliki efektifitas yang terbatas terhadap senyawa organik semivolatil dan pestisida. Namun sistem yang dirancang agar lebih efektif terhadap kontaminan organik sedang dikembangkan dan diuji (Swarnalatha *et al.*, 2006).

Stabilisasi/solidifikasi secara *ex situ* mempunyai keuntungan dimana baik reagen cair maupun padat dapat digunakan untuk mengolah media yang terkontaminasi dengan menggunakan alat pengadukan yang umum digunakan. Selain itu sampel dari material yang diolah lebih mudah didapatkan selama proses S/S berlangsung. Aplikasi S/S secara *ex situ* melibatkan peralatan yang lebih umum dan banyak 'vendor' yang mampu menerapkan metode ini. Metode ini memungkinkan identifikasi segala pengolahan yang tidak memadai dengan lebih cepat dan memungkinkan pembuangan di *landfill*. Pengolahan secara *ex situ* cocok diterapkan pada tanah dangkal, terletak di atas permukaan air tanah. Pengolahan secara *ex situ* mampu menghilangkan material-material tertentu yang tidak diinginkan, serta memiliki biaya pengolahan yang lebih rendah (Bates dan Hills, 2015).

A. Peralatan

Alat pertama yang dibutuhkan untuk S/S secara *ex situ* adalah ruang pencampuran (*mixing chamber*). Ruang pencampuran dirancang untuk mencampur bahan untuk S/S sehingga menghasilkan reagen yang homogen. Hal-hal yang mempengaruhi pencampuran bahan dan jumlah energi yang masuk untuk pembentukan campuran dipengaruhi oleh:

- Jenis bahan yang bisa diolah atau dicampur.
- Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mencampur bahan yang disajikan.

- Ketelitian dari tindakan pencampuran (tingkat homogenitas produk).
- Biaya proses pencampuran.

Penyusunan ruang pencampuran bisa dilakukan secara horizontal atau vertikal. Biasanya, ruang pencampuran horizontal digunakan untuk pencampuran yang bersifat kontinyu, sementara ruang pencampuran vertikal digunakan untuk pencampuran secara *batch mixing*.

Pug Mill Mixers

Pug mill mixers adalah mixer horizontal yang dapat digunakan untuk pencampuran reagen S/S secara kontinyu. Bahan yang dicampur dapat berupa bubuk kering, bubur tipis, dan pasta tebal. Sebuah pug-mill terdiri dari palung pencampuran horizontal dengan inlet di atas salah satu ujung dan outlet di bawah ujung yang lain serta dilengkapi 2 *shaft* dengan pedal.

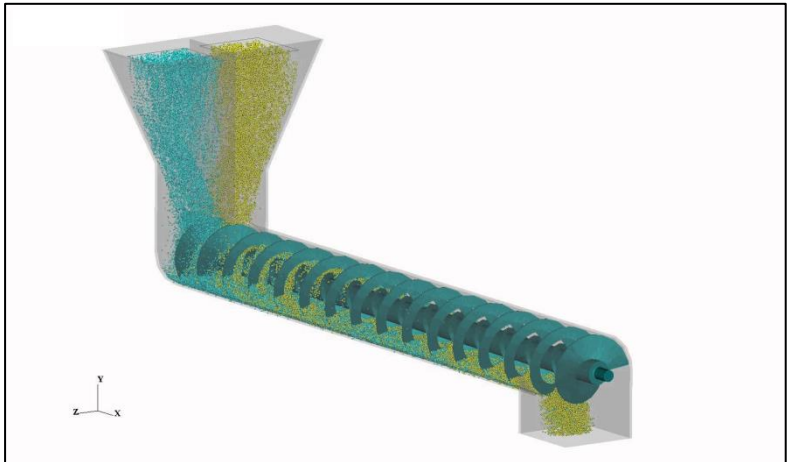


Gambar 3. 16 *Pug-mill Mixer* dan Alat Pendukungnya
Sumber : Bates dan Hills, 2015

Screw Mixers

Screw mixers adalah mixer horizontal yang dapat digunakan untuk pencampuran reagen S/S secara kontinyu. Bahan yang dicampur dapat berwujud bubuk kering dan padat, dengan kadar air di bawah plastisitas. *Screw mixers* terdiri dari alat pengaduk berbentuk melingkar yang umumnya mempunyai setidaknya sepuluh kali ukuran yang lebih besar dari lebar *screw mixers*. Terdapat sebuah bor sekrup yang dipasang pada poros, dan penggerak untuk memutar poros. Gambar *screw mixers* dapat dilihat pada Gambar 3.17.

Screw mixers tidak dapat digunakan untuk padatan lengket atau plastik yang memiliki kecenderungan menggumpal dalam mixer.



Gambar 3. 17 *Screw Mixers*
Sumber : Bates dan Hills, 2015

Ribbon Blenders

Ribbon blenders adalah mixer horizontal yang dapat digunakan untuk pencampuran reagen S/S secara kontinyu. Bahan yang dicampur dapat berwujud bubuk kering, bubur tipis, padatan dengan kadar air dibawah plastisitas. *Ribbon blenders* memiliki alat pengaduk berbentuk palung yang umumnya berukuran dua atau tiga kali lebih panjang dari lebar *ribbon blenders*. Terdapat sebuah alat yang merupakan kombinasi pisau

dan pedal untuk mengaduk dan sebuah penggerak untuk memutar poros *ribbon blenders*. Gambar *ribbon blenders* dapat dilihat pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 18 *Ribbon Blenders*
Sumber : Bates dan Hills, 2015

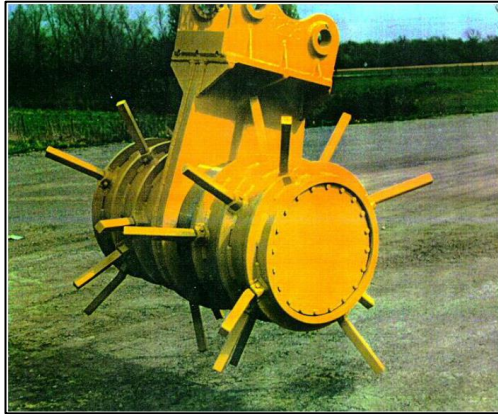
Untuk mencampur reagen S/S dengan limbah, diperlukan alat berat yang memiliki kemampuan mengangkat, menyaring, dan mencampur bahan. Alat berat yang digunakan untuk mencampur reagen S/S dengan limbah adalah ekskavator. Ekskavator dapat digunakan untuk mengolah limbah baik secara *in situ* maupun secara *ex situ*. Pada S/S secara *in situ*, limbah yang akan diolah dibagi menjadi beberapa sel. Reagen kering atau cair disebar di atas permukaan sel, selanjutnya ekskavator digunakan untuk mencampur reagen dengan limbah hingga homogen. Selanjutnya limbah yang terolah ditinggalkan di tempat pengolahan atau diangkut untuk ditimbun di tempat pembuangan. Pada S/S secara *ex situ* limbah yang akan diolah diletakkan pada permukaan beton atau daerah yang sudah diberi *liner*. Reagen disebar di atas permukaan limbah. Ekskavator akan mengaduk reagen S/S dan limbah hingga homogen. Jenis-jenis ekskavator dapat dilihat pada Gambar 3.19 – 3.21.



Gambar 3. 19 Ekskavator yang dilengkapi dengan *Bucket Mixer*
Sumber: Bates dan Hills, 2015



Gambar 3. 20 Ekskavator yang dilengkapi dengan *Rotating Rake Mixer*
Sumber: Bates dan Hills, 2015



Gambar 3. 21 Ekskavator yang dilengkapi *Rotating Mixing Head*
Sumber: Bates dan Hills, 2015

Rototiller

Rototiller menggunakan poros yang berputar dengan tines melengkung yang dirancang untuk memotong, melonggarkan, dan mengangkat tanah sembari bergulung di atas permukaan. *Rototiller* biasanya dipasang di belakang *backhoe*, *front-end loader*, atau *traktor* dan menggunakan sistem hidrolik dari peralatan yang dirangkai untuk menggerakkan motor dan memutar poros. *Rototiller* dapat digunakan untuk mengolah tanah baik *in situ* atau *ex situ*.



Gambar 3. 22 *Rototiller* untuk Rangkaian Traktor Kecil Sumber: Bates dan Hills, 2015

Tabel 3. 12 Tabel Peralatan untuk S/S Secara *Ex Situ*

No	Nama Alat	Keunggulan	Kelemahan
Ruang Pencampuran (<i>Mixing Chamber</i>)			
1	<i>Pug-mill Mixers</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pug-mill</i> berkapasitas tinggi (200 ton bahan per jam). • Memiliki energi pencampuran yang tinggi. Poros kembar dalam <i>pug-mill</i> dapat memutar sampai dengan 500rpm. • Sangat homogen dan menghasilkan produk S/S yang tercampur dengan baik. • <i>Pug-mill</i> sangat toleran terhadap puing-puing dan biasanya akan mentolerir batu-batu kecil dan potongan-potongan batu bata, beton, kayu, dan puing-puing logam. • Secara efektif dapat memproses tanah atau limbah dari konsistensi variabel luas, mampu menagani cairan kental secara efektif, bubuk, dan plastik atau padatan bersifat lengket. • Dapat diangkut dan sering dipasang pada bingkai roda untuk transportasi jalan. • Mampu siap beroperasi dalam waktu kurang dari setengah hari • Relatif murah untuk mobilisasi, <i>set-up</i>, operasi dan demobilisasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Jumlah material yang melewati sistem tergantung pada karakteristik media limbah (kadar air, plastisitas, distribusi ukuran partikel). • Limbah / tanah diperlakukan harus disaring untuk menghilangkan kotoran yang lebih besar dari 50mm. Sehingga memungkinkan kebutuhan langkah-langkah penanganan / pengolahan tambahan, termasuk pengeringan bahan limbah dengan kadar air di atas batas plastik, seperti yang diperlukan untuk memungkinkan penyaringan yang efektif. • Untuk volume limbah kurang dari 2.000 m³ dapat memberi dampak ekonomi secara signifikan.
2	<i>Screw Mixers</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Memiliki kecepatan rotasi yang tinggi sehingga mampu mencampur media 	<ul style="list-style-type: none"> • Jumlah material yang melewati sistem tergantung pada karakteristik bahan limbah (kadar air,

No	Nama Alat	Keunggulan	Kelemahan
		limbah dan reagen secara menyeluruh. <ul style="list-style-type: none"> • <i>Screw mixer</i> mampu memproses lebih dari 100 ton per jam. • Mudah dioperasikan dan hanya memiliki sedikit bagian bergerak yang perlu dirawat. 	plastisitas, distribusi ukuran partikel) dan desain <i>screw</i> (yang mengontrol waktu tinggal di <i>mixer</i>). <ul style="list-style-type: none"> • Bahan limbah harus dsaring untuk menghilangkan kotoran yang lebih besar dari 1 inci, <i>screw mixers</i> tidak toleran terhadap puing-puing yang keras, seperti beton, batu bata, logam. • Langkah penanganan / pengolahan lainnya mungkin diperlukan untuk mempersiapkan media limbah, termasuk, misalnya, pengeringan bahan limbah dengan kadar air diatas batas plastic mereka (untuk memungkinkan penyaringan dan pengolahan lanjutan) • <i>Screw mixers</i> tidak mampu menangani media limbah yang berada diatas batas plastis atau yang bersifat lengket atau lekat di alam. • Umumnya tidak cocok untuk mencampur cairan. • <i>Screw mixers</i> biasanya dirancang untuk <i>fixed facilities</i>.
3	<i>Ribbon Blenders</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Memiliki kecepatan rotasi yang tinggi sehingga mampu mencampur media limbah dan reagen secara menyeluruh. • <i>Ribbon blenders</i> mampu memproses lebih dari 20 ton per jam. • Mudah dioperasikan dan hanya memiliki sedikit bagian bergerak yang perlu 	<ul style="list-style-type: none"> • Jumlah material yang melewati sistem tergantung pada karakteristik bahan limbah (kadar air, plastisitas, distribusi ukuran partikel) dan desain <i>ribbon blenders</i> (yang mengontrol waktu tinggal di <i>mixer</i>). • Bahan limbah harus sering disaring untuk menghilangkan kotoran yang lebih besar dari

No	Nama Alat	Keunggulan	Kelemahan
		<p>dirawat.</p> <ul style="list-style-type: none"> Banyak <i>fixed facilities</i> yang mengolah lumpur dan cairan dengan memanfaatkan <i>ribbon mixers</i> karena sederhana untuk dioperasikan dan ketelitian yang baik dari pencampuran. 	<p><i>offset</i>, umumnya kurang dari 1 cm.</p> <ul style="list-style-type: none"> Sangat tidak toleran terhadap puing-puing, terutama puing-puing keras. Tidak mampu menangani plastik, media limbah yang lengket atau lekat. <i>Ribbon blenders</i> biasanya dirancang untuk <i>fixed facilities</i>.
Alat Pencampur			
4	<i>Excavator Bucket Mixing</i>	<ul style="list-style-type: none"> Alat konstruksi umum digunakan. Operator membutuhkan pelatihan yang mudah untuk mengoperasikan alat. Umumnya tidak terpengaruh oleh adanya puing-puing (kayu, beton, logam) dalam limbah. Mampu mengolah hingga 920 m³ limbah per hari. 	<ul style="list-style-type: none"> Harus memungkinkan untuk menyebar reagen S/S tepat di atas limbah yang akan diolah. Rangkaian <i>mixer</i> tertentu tidak toleran terhadap adanya puing-puing. Sehingga perlu menghilangkan puing-puing sebelum mengolah limbah. Umumnya ekskavator tidak dirancang untuk mencampur limbah dan reagen S/S. Kemungkinan bahan yang akan diolah tidak tercampur secara homogen kecuali pencampuran dilakukan dengan waktu yang cukup lama. Tanah dengan tingkat plastisitas tinggi tidak memadai untuk dilakukan pencampuran. Beberapa rangkaian <i>mixer</i> tertentu kemungkinan memiliki harga yang mahal, tidak tersedia secara lokal, dan membutuhkan lebih banyak pelatihan bagi operator untuk mengoperasikannya.

No	Nama Alat	Keunggulan	Kelemahan
Alat Lain			
5	<i>Rototiller</i>	<ul style="list-style-type: none"> Dapat dengan mudah mengolah tanah hingga kedalaman 30 cm baik secara <i>ex situ</i> maupun <i>in situ</i> Untuk S/S secara <i>in situ</i>, <i>rototiller</i> mampu mengolah tanah hingga 1900 m³ per hari. 	<ul style="list-style-type: none"> Harus memungkinkan untuk menyebar reagen S/S tepat di atas limbah yang akan diolah. Kegiatan penyebaran reagen pada S/S secara <i>ex situ</i> memiliki batasan maksimal pengolahan mendekati 765 m³ per hari. Umumnya <i>rototiller</i> tidak dirancang untuk mencampur tanah dan reagen S/S. Kemungkinan bahan yang akan diolah tidak tercampur secara homogen kecuali <i>rototiller</i> dilewatkan ke media berkali-kali. <i>Plastic soils</i> tidak memadai untuk dilakukan pencampuran. Tidak cocok digunakan pada batu bata, beton, atau puing-pung logam dengan ukuran diameter lebih besar dari 5 cm. Sulit digunakan pada permukaan tanah yang tidak umum. Bukan peralatan konstruksi jalan yang standar, dan kemungkinan tidak tersedia secara lokal.
6	<i>Asphalt Miller</i>	<ul style="list-style-type: none"> Dapat dengan mudah mengolah tanah hingga kedalaman 30 cm baik secara <i>ex situ</i> maupun <i>in situ</i> Merupakan peralatan konstruksi jalan yang standar dan dapat ditemukan di seluruh dunia. 	<ul style="list-style-type: none"> Harus memungkinkan untuk menyebar reagen S/S tepat di atas limbah yang akan diolah. Kegiatan penyebaran reagen pada S/S secara <i>ex situ</i> memiliki batasan maksimal pengolahan mendekati 765 m³ per hari. Umumnya <i>rototiller</i> tidak dirancang untuk

No	Nama Alat	Keunggulan	Kelemahan
		<ul style="list-style-type: none"> Hanya memerlukan sedikit keahlian teknis untuk mengoperasikan peralatan. Mampu menangani puing-puing non logam. Untuk S/S secara <i>in situ</i>, <i>rototiller</i> mampu mengolah tanah hingga 2680 m³ per hari. 	<p>mencampur tanah dan reagen S/S. Kemungkinan bahan yang akan diolah tidak tercampur secara homogen.</p> <ul style="list-style-type: none"> Tanah non kohesif atau <i>plastic soils</i> dimungkinkan tidak memadai untuk dipindah ke konveyor. Memiliki kesulitan beroperasi pada permukaan tanah.

Dalam S/S secara *ex situ*, dibutuhkan tempat pengadukan yang memungkinkan alat berat untuk mencampur reagen S/S dan tanah yang terkontaminasi yang kemudian disebut *mixing pits*. Beberapa jenis *mixing pits* yang biasa diterapkan diantaranya *earthen pits*, *open top tanks*, dan *enclosures*.

Earthen pits

Earthen pits dapat dibuat dengan cara menggali tanah terkontaminasi atau memanfaatkan galian tanah yang sudah ada. Media limbah dipindah ke dalam lubang menggunakan ekskavator atau *loader*, dan reagen (basah atau kering) ditambahkan ke lubang. Ekskavator kemudian digunakan untuk mencampur limbah dan reagen sampai terlihat produk homogen telah terbentuk.



Gambar 3. 23 Ekskavator yang Mengaduk Reagen Kapur dan Limbah Terkontaminasi Minyak pada *Earthen Pits*
Sumber: Bates dan Hills, 2015

Open-top tanks

Open-top tanks merupakan tangki terbuka terbuat dari logam atau beton dimana limbah atau tanah ditempatkan untuk dicampur dengan reagen S/S. Limbah di angkut ke dalam tangki

terbuka dengan menggunakan konveyor, ekskavator, atau *loader*. Sementara reagen baik dalam keadaan kering atau basah, ditambahkan langsung ke tangki. Penerapan *mixing pits* jenis *open top tanks* dengan menggunakan *roll-off box* dapat dilihat pada Gambar 3.24.



Gambar 3. 24 Pengolahan Secara *Ex-Situ* pada *Roll-off Box*
Sumber: Bates dan Hills, 2015

Kerugian dari segi teknis untuk S/S secara *ex situ* adalah kebutuhan ruang yang tinggi dan kesulitan dalam penanganan material. S/S secara *ex situ* membutuhkan ruang yang cukup untuk persediaan bahan yang akan diolah dan menyimpan produk hingga kegiatan remediasi dengan S/S selesai. Teknik S/S secara *ex situ* melibatkan hal-hal logistik seperti pengangkutan media terkontaminasi ke lokasi pengolahan S/S dan ke lokasi disposisi akhir (*off site* atau *on site*).

Tabel 3. 13 Keunggulan dan Kelemahan *Mixing Pits*

No	Nama	Keunggulan	Kelemahan
1	<i>Earthen pits</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ukuran bisa bervariasi sesuai kebutuhan pencampuran. Berkisar dari 20 sampai 1.000 m³. • Tidak membutuhkan penyimpanan sekunder • Banyak pilihan sederhana untuk menempatkan media limbah ke dalam lubang • Umumnya hanya operator peralatan dan buruh yang dipekerjakan untuk menjalankan pencampuran pada pit. Hanya ekskavator yang dibutuhkan untuk pencampuran. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dibatasi oleh jangkauan lengan ekskavator. • Ekskavator atau loader mungkin perlu untuk melacak bahan dan mencampur bahan pada bagian pit lainnya yang kurang terjangkau. • Diperlukan struktur atau bangunan mengatasi debu atau bau. Struktur atau bangunan ini perlu <i>mobile</i> bila bahan yang diolah dibiarkan didalam pit.
2	<i>Open-top Tanks</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kontainer logam sederhana seperti kotak <i>roll-off</i> atau terbalik kontainer kapal dapat digunakan untuk tank. Ukuran tangki yang dapat digunakan berkisar antara 8 - 765 m3 • Banyak pilihan cara sederhana untuk menempatkan limbah ke dalam tangki. • Memerlukan jumlah pekerja yang sedikit 	<ul style="list-style-type: none"> • Dibatasi oleh jangkauan lengan ekskavator • Operator ekskavator perlu dengan cermat mempertimbangkan dasar dari tangki. Sehingga tidak terjadi kerusakan tangki akibat hantaman ekskavator.

3.2.2.6 Penutupan dan Monitoring Pasca Pengolahan S/S

A. Penutupan Pasca Pengolahan S/S

Kegiatan pasca pengolahan S/S harus mempertimbangkan penggunaan lahan di masa depan, operasi dan pemeliharaan pasca remediasi, kebutuhan untuk pemantauan jangka panjang dan lain-lain. Penutupan tanah yang telah diremediasi dengan S/S (monolit S/S) merupakan salah satu kegiatan pasca pengolahan S/S. Penutupan monolit S/S menggunakan lapisan-lapisan kedap air. Tujuan penutupan adalah untuk mengalirkan air permukaan dari monolit S/S untuk mencegah adanya genangan dan infiltrasi air ke dalam monolit S/S. S/S secara *in situ* maupun *ex situ* memiliki pertimbangan yang sama dalam memilih desain penutupan dan monitoring pasca pengolahan. Faktor-faktor perlu dipertimbangkan dalam penutupan S/S diantaranya:

- Iklim dan geografis
- Geometri lahan
- Integrasi dengan fasilitas eksisting
- Pemanfaatan lahan di masa depan
- Pihak-pihak yang terdampak dengan serangkaian kegiatan pengolahan
- Peraturan yang berlaku

1) Iklim dan Geografis

Hal yang perlu diperhatikan adalah ada atau tidaknya sumber air permukaan, iklim lokasi remediasi yang mempengaruhi stabilitas jangka panjang monolit S/S. Pengelolaan air permukaan mempertimbangkan intensitas hujan, siklus pembasahan dan pengeringan yang berdampak pada permukaan monolit S/S. Sedangkan iklim lokasi remediasi mempengaruhi ketebalan tutup, geometri akhir dan elevasi monolit S/S terhadap lahan.

2) Geometri Lahan

Geometri lahan akan mempengaruhi dimana dan bagaimana material S/S ditempatkan. Elevasi monolit S/S perlu dipertimbangkan untuk desain drainase air permukaan.

3) Integrasi dengan Fasilitas Eksisting

Segala kegiatan pasca remediasi perlu mempertimbangkan semua fasilitas eksisting baik di bawah

dan di atas tanah. Contoh kondisi yang perlu diperhatikan adalah adanya sistem perpipaan, dekat dengan struktur pondasi, dan adanya jalan raya.

4) **Kegiatan yang Berpengaruh**

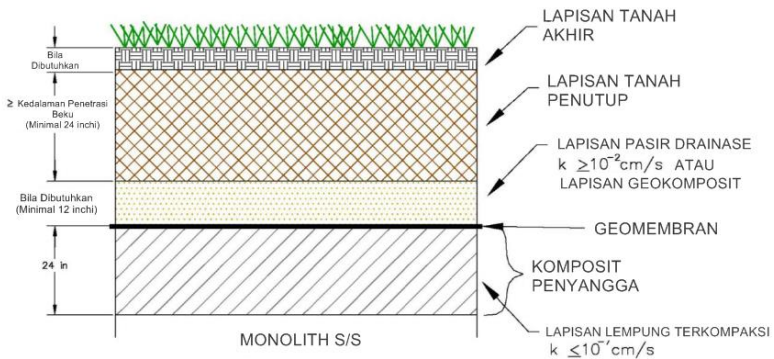
Beberapa kegiatan yang berpotensi mempengaruhi lapisan penutup dan monolit S/S diantaranya:

- *Landscaping*, termasuk penanaman pohon dan/atau rerumputan
- *Re-grading* / modifikasi ketebalan lapisan penutup dan/atau mengangkat atau menempatkan kembali bagian monolit S/S untuk meratakan lahan kembali dan mengakomodasi drainase baru.
- Pengangkatan material monolit untuk mengakomodasi lapisan dasar baru dan atau infrastruktur baru. Fleksibilitas desain penutup perlu dipertimbangkan untuk memungkinkan pengangkatan material monolit di masa depan.
- Mengurangi elevasi monolit untuk memungkinkan dibangunnya pondasi bangunan yang dangkal.
- Perbaikan kondisi tanaman lansekap

5) **Peraturan yang Berlaku**

Persyaratan mengenai desain, konstruksi, dan perawatan dari penutup S/S monolit pasca remediasi diatur oleh badan pembuat peraturan lokal, regional dan nasional yang bertanggung jawab untuk menyetujui rencana dan kegiatan remediasi tanah tercemar. Sebagai contoh, proyek dibawah program Superfund USEPA menggunakan spesifikasi penutupan untuk limbah yang diolah dengan S/S sebagai berikut:

- Sebuah lapisan tanah penutup untuk mengatasi erosi
- Lapisan drainase seperti pasir dan / atau kerikil, atau geo-komposit yang terdiri dari geo-net dengan geotekstil (pada satu atau kedua sisi)
- Lapisan penghalang 90 cm dengan konduktivitas hidrolis maksimum 1×10^{-7} cm / detik



Gambar 3. 25 Lapisan Penutup Monolit S/S

Sumber : US EPA, 2000

Tujuan utama penutupan monolit S/S adalah untuk mencegah air permukaan menggenang dan sebagai pelindung dari kontak langsung terhadap benda-benda yang berpotensi merusak monolit S/S. Desain penutup akan bergantung pada lokasi dan fungsi dari lahan. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan untuk menutup monolit S/S diantaranya:

- Kompatibilitas dengan ukuran butir tanah dan kontur tanah
- Ketebalan penutup yang mampu melindungi monolit dari kontak langsung dan gangguan oleh lingkungan. Contoh : peristiwa pembekuan / pencairan dan paparan basah / kering karena iklim
- Ketersediaan bahan tanah untuk membangun penutup monolit S/S. Contoh : ketersediaan tanah liat dengan permeabilitas rendah)
- Persyaratan pengendalian erosi untuk pengelolaan limpasan air permukaan
- Daya dukung untuk pertumbuhan vegetasi dan restorasi lansekap.

Terdapat beberapa jenis sistem penutup yang mampu digunakan untuk menutup monolit S/S, diantaranya:

- Penutup berbahan tanah seperti *clay* dan/atau bahan geologis lain yang memiliki permeabilitas rendah
- Sistem penutupan menggunakan geomembran. Contoh: *high density polyethylene* (HDPE), *low density polyethylene* (LDPE), atau *polyvinyl chloride* (PVC) fabrikasi yang halus maupun bertekstur
- Sistem penutupan *Geo-synthetic clay liner* (GCL) yang menggunakan tanah bentonit yang terikat dengan geotekstil atau geomembran
- Penutup *evapotranspiration* (ET), menggunakan butiran tanah halus dan kasar untuk membuat rongga kapiler untuk mencegah kondisi jenuh di atas monolit S/S
- Aspal dan perkerasan beton yang dapat digunakan sebagai penutup utama atau kombinasi teknologi penutupan lainnya

Teknologi penutupan monolit S/S dapat digunakan sendiri atau dikombinasikan (komposit) di lokasi tertentu. Tabel 3.13 memuat efektivitas berbagai jenis material sebagai lapisan penutup monolit S/S.

B. Monitoring Pasca Pengolahan S/S

Setelah kegiatan remediasi dengan S/S termasuk penutupan telah selesai, maka kegiatan monitoring dengan periode tertentu perlu dilakukan. Faktor utama dalam mengembangkan program monitoring adalah memenuhi persyaratan pada peraturan yang berlaku. Sebagai contoh, berikut adalah aktivitas monitoring yang diatur oleh US EPA dalam melaksanakan kegiatan pasca konstruksi pada lahan-lahan remediasi Superfund:

1) Operation and Maintenance (O&M)

Kegiatan ini merupakan kegiatan yang diperlukan untuk menjaga keefektifan dan integritas dari kegiatan remediasi. Kegiatan ini meliputi pemeliharaan lapisan penutup akhir dengan cara perawatan vegetasi penutup dan penanganan erosi pada bagian yang memiliki kemiringan.

2) Pemantauan Kualitas Air Tanah

Pemantauan kualitas air tanah dilakukan dengan membuat sumur pantau di bagian luar area S/S. Kemudian sampel air tanah diambil melalui sumur pantau dan diuji kualitasnya. Apabila dinyatakan terkontaminasi maka perlu upaya penanganan lebih lanjut.

3) Pemantauan Kualitas Air Permukaan

Apabila kegiatan S/S dilakukan disekitar sungai atau badan air, maka perlu dilakukan pemantauan kualitas air permukaan. Pemantauan dapat dilakukan dengan cara mengambil sampel air, biota air, atau sedimen pada badan air. Sampel yang diuji kualitasnya dan apabila dinyatakan terkontaminasi maka perlu upaya penanganan lebih lanjut.

4) *Institutional Controls*

Institutional controls menggunakan instrumen non-teknis seperti upaya administratif dan/atau hukum yang mampu meminimalisir potensi manusia mengkontaminasi lahan yang sudah diremediasi. Selain itu *institutional controls* juga melindungi integritas remediasi dengan membatasi penggunaan lahan dan sumber daya.

Tabel 3. 14 Efektifitas Berbagai Jenis Material sebagai Lapisan Penutup Monolit S/S

Jenis Penutup	Konstruktabilitas	Permeabilitas	Ketahanan Terhadap Sifat Beku/Cair	Pengeringan
Single Component Caps				
Tanah Liat atau Tanah Lempung	Perlu pemadatan dan penempatan di lahan yang ditutup	Bervariasi, namun bisa mencapai kurang dari 1×10^{-5} cm/detik (1×10^{-7} m/detik)	Sedang	Resistansi sedang
<i>Compacted Clay</i>	Memerlukan tingkat pemadatan yang lebih tinggi daripada tanah penutup biasa	Bervariasi, biasanya diantara 1×10^{-5} cm/detik (1×10^{-7} m/detik) hingga kurang dari 1×10^{-7} cm/detik (1×10^{-9} m/detik)	Daya tahan rendah bila tidak disediakan penutup yang mampu melindungi dari pembekuan pada musim dingin	Resistansi rendah jika tidak disediakan penutup yang mampu menghalangi kehilangan kelembaban
Geomembran	HDPE atau PVC membutuhkan lapisan tanah dasar sebelum ditempatkan	Kurang dari 1×10^{-7} cm/detik (1×10^{-9} m/detik)	Daya tahan tinggi	Resistansi tinggi
<i>Geosynthetic clay liner (GCL)</i>	Dapat ditempatkan secara langsung di atas monolit S/S	Kurang dari 1×10^{-7} cm/detik (1×10^{-9} m/detik)	Daya tahan tinggi	Resistansi rendah jika tidak disediakan penutup yang

Jenis Penutup	Konstruktabilitas	Permeabilitas	Ketahanan Terhadap Sifat Beku/Cair	Pengeringan
				mampu menghalangi kehilangan kelembaban
Composite Caps				
Clay dengan geomembran	Lapisan clay dapat ditempatkan langsung di atas monolit S/S diikuti oleh geomembran	Kurang dari 1×10^{-7} cm/detik (1×10^{-9} m/detik)	Daya tahan tinggi	Resistansi tinggi
Geosynthetic clay liner (GCL)dengan geomembran	Gunakan GCL yang terikat pada geomembran dan tempatkan secara langsung di atas lapisan tanah dasar	Kurang dari 1×10^{-7} cm/detik (1×10^{-9} m/detik)	Daya tahan tinggi	Resistansi tinggi

3.3 Keunggulan dan Kelemahan Aplikasi Proses Stabilisasi/Solidifikasi

Dalam penerapannya, stabilisasi/solidifikasi memiliki keunggulan dan kelemahan. Menurut Sharma (2004), beberapa keunggulan dari aplikasi proses stabilisasi/solidifikasi secara umum adalah:

- a. Biaya relatif rendah, karena reagen tersedia secara luas dan tidak mahal.
- b. Produk memiliki stabilitas jangka panjang yang baik.
- c. Bahan-bahan yang digunakan tidak beracun.
- d. Produk bersifat inert terhadap radiasi.
- e. Produk tahan terhadap biodegradasi.
- f. Solubilitas produk rendah.
- g. Permeabilitas produk relatif rendah.
- h. Produk mempunyai karakteristik yang baik.
- i. Dapat diterapkan pada berbagai macam kontaminan.
- j. Dapat diterapkan pada berbagai macam jenis tanah.

Sedangkan beberapa kelemahan dari aplikasi proses stabilisasi/solidifikasi menurut Sharma (2004) dan US EPA (2000) secara umum adalah:

- a. Kontaminan masih ada di dalam tanah, tidak rusak atau hilang.
- b. *Volatile organic compound* dan beberapa partikulat dapat keluar saat proses pengolahan.
- c. Terkadang bahan pengikat sulit untuk dimasukkan dan diaduk ke dalam tanah.
- d. S/S secara *in situ* mungkin tidak dikembangkan kembali.

Tabel 3. 15 Efektifitas Stabilisasi/Solidifikasi pada Berbagai Jenis Kontaminan

	Kelompok Kontaminan		
	Senyawa Organik	Senyawa Anorganik	Senyawa Reaktif
Terbukti : Pengujian yang berhasil dilakukan	Semivolatil terhalogenasi Semivolatil dan nonvolatil tidak terhalogenasi	Logam volatil Logam nonvolatil Asbes Zat radioaktif Korosif anorganik Sianida anorganik	Oksidator Reduktor
Potensial : Pendapat ahli tentang teknologi yang akan efektif diterapkan	PCBs Pestisida Dioxin/furan Sianida organik Korosif Organik		
Tidak efektif: Pendapat ahli tentang teknologi yang tidak akan / tidak efektif diterapkan	Volatil terhalogenasi Volatil tidak terhalogenasi		

Sumber : US EPA, 1993

3.3.1. Aplikasi pada Pencemar Organik

Secara tradisional, limbah terkontaminasi dengan organik non-volatil dan semi-volatil seperti dioxin, bahan peledak, berbagai minyak pelumas dan hidrokarbon aspal minyak bumi, pestisida, poliaromatik hidrokarbon (PAH) *polychlorinated biphenyls* (PCB), diolah dengan teknologi termal secara *on-site*. Namun teknologi ini terhambat oleh penerimaan publik dan peraturan teknologi pengolahan termal yang ada (Bates dan Hills, 2015).

S/S telah menjadi alternatif pengolahan dengan biaya rendah yang dapat diterima untuk mengurangi mobilitas, dan dengan demikian dapat meminimalkan paparan senyawa organik. S/S biasanya tidak diterapkan pada senyawa organik

yang mudah menguap. Solidifikasi pada limbah organik sering menghasilkan produk yang memiliki kekuatan buruk. Interaksi yang muncul antara kandungan organik dan semen mempengaruhi proses dari stabilisasi produk (Trussel dan Spence, 1994). Apabila senyawa organik dicampur dengan semen, maka akan mempengaruhi kinetika hidrasi semen sehingga mengakibatkan lambatnya reaksi ikatan oleh semen tersebut (Karamalidis dan Voudrias, 2007).

Imobilisasi fisik komponen organik telah menjadi fokus utama pada beberapa mekanisme. Tremblay *et al.* (1987) telah menunjukkan bahwa asam-asam organik yang dicampur dengan tanah dan semen dan menghasilkan pH yang lebih kecil dari 9 pada campuran dapat menghambat terbentuknya matriks semen. Terhambatnya matriks semen disebabkan karena pH yang terlalu rendah untuk memungkinkan terbentuknya mineral sekunder. Minyak dan hidrokarbon dapat menghambat reaksi hidrasi semen. Minyak dan hidrokarbon akan melapisi partikel semen, namun tidak mempengaruhi kekuatan akhir produk S/S. Tabel 3.16 menyatakan kesesuaian limbah organik dengan teknik S/S.

Salah satu kontaminan organik yang bisa diatasi dengan S/S adalah lumpur *drill cuttings*. Lumpur *drill cuttings* adalah tanah, fragmen batuan, dan material berbentuk serbuk yang dikeluarkan dari lubang pengeboran minyak dan gas. Lumpur *drill cuttings* juga mengandung sedikit cairan yang dihasilkan dari proses pengeboran (Mauger *et al.*, 2014). Lumpur *drill cuttings* dapat dikelola dengan pembuangan, baik di laut ataupun di *landfill*, ditimbun, diolah dengan teknologi termal, dan stabilisasi/solidifikasi (S/S). Kogbara *et al.* (2016) mengolah limbah *petroleum drill cuttings* dengan kombinasi stabilisasi/solidifikasi dan bioaugmentasi. Kombinasi pertama melibatkan bioaugmentasi saat proses S/S berlangsung. Kombinasi kedua melibatkan bioaugmentasi dari monolit S/S yang sudah berbentuk butiran-butiran. Reagen S/S yang digunakan adalah karbon aktif dan semen. Hasil penelitian Kogbara *et al.* (2016) menunjukkan bahwa bioaugmentasi dan S/S dengan menggunakan bahan aditif tertentu dapat memfasilitasi biodegradasi TPH dan fiksasi logam berat secara paralel pada lumpur *drill cuttings*.

Tabel 3. 16 Kecocokan Limbah Organik dengan Teknik Stabilisasi/Solidifikasi

Jenis Limbah	Tipe Pengolahan			
	S/S Berbasis Semen	S/S Berbasis Pozzolan	Kapsulasi Mikro Termoplastik	Kapsulasi Permukaan
Pelarut Organik dan Minyak	Dapat menghambat proses. Dapat terlepas sebagai uap.	Dapat menghambat proses. Dapat terlepas sebagai uap.	Senyawa organik dapat menguap selama pemanasan.	Harus diabsorpsi terlebih dahulu pada matriks padat.
Organik padat (plastik, resin, tar)	Baik untuk diterapkan, seringkali meningkatkan daya tahan produk.	Baik untuk diterapkan, seringkali meningkatkan daya tahan produk.	Memungkinkan untuk digunakan sebagai bahan pengikat pada sistem ini.	Cocok untuk digunakan, banyak plastik yang dibutuhkan untuk bahan kapsulasi.

Sumber : US EPA, 1986

3.3.2. Aplikasi pada Pencemar Anorganik

Seiring berkembangnya teknologi, upaya pengolahan tanah tercemar dengan menggunakan S/S juga diaplikasikan pada tanah tercemar logam berat. Karena logam berat tidak dapat dihancurkan, S/S mampu mengimobilisasi sifat toksik dari logam pada material limbah. Selain logam, terdapat senyawa anorganik lain yang tidak dapat dihancurkan di alam. S/S berperan dalam mengimobilisasi senyawa toksik dengan membungkus dalam fase semen atau struktur pori dari wujud limbah. Anion yang seringkali diolah menggunakan S/S diantaranya fluor (F^-), sianida (CN^-), nitrat (NO_3^-), fosfat (PO_4^{3-}), dan sulfide (S^{2-}). Klorida dapat dengan mudah diolah dengan S/S berbasis semen, namun bila melebihi kapasitas pengikatannya, maka semen yang digunakan akan mudah hilang karena difusi / disolusi pada pemaparan gradien hidrolik (Bates dan Hills, 2015). Tabel 3.17 menyatakan kesesuaian limbah anorganik dengan teknik S/S.

Dermatas dan Meng (2003), telah melakukan penelitian tentang pemanfaatan *fly ash* dan kapur untuk mengimobilisasi logam berat timbal dan kromium dengan teknologi S/S. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa S/S dengan kapur dan *fly ash* mampu menghasilkan produk S/S dengan kuat tekan yang baik dan mengimobilisasi logam berat timbal dan kromium dengan baik. Kapur yang berikatan dengan sulfat mampu mengimobilisasi logam berat Pb secara efektif. Sedangkan *fly ash* secara efektif berperan dalam mengimobilisasi logam berat kromium.

Tabel 3. 17 Kesesuaian Limbah Anorganik dengan Teknik Stabilisasi/Solidifikasi

Jenis Limbah	Tipe Pengolahan			
	S/S Berbasis Semen	S/S Berbasis Pozzolan	Kapsulasi Mikro Termoplastik	Kapsulasi Permukaan
Limbah B3 mengandung asam (pH rendah)	Semen dapat menetralkan asam.	Cocok diterapkan, akan menetralkan asam.	Dapat dinetralkan terlebih dahulu sebelum digabungkan.	Dapat dinetralkan terlebih dahulu sebelum digabungkan.
Limbah B3 mengandung senyawa sulfat	Dapat menghambat <i>setting</i> dan keretakan produk kecuali menggunakan semen khusus	Kompatibel	Dapat terjadi dehidrasi dan rehidrasi yang menyebabkan keretakan.	Kompatibel
Limbah B3 mengandung senyawa halida	Kompatibel	Kompatibel	Kompatibel	Kompatibel
Bahan Radioaktif	Kompatibel	Kompatibel	Kompatibel	Kompatibel

Sumber : US EPA, 1986

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

PEMBAHASAN STUDI KASUS

4.1 Kasus Aplikasi S/S yang Berhasil Diterapkan

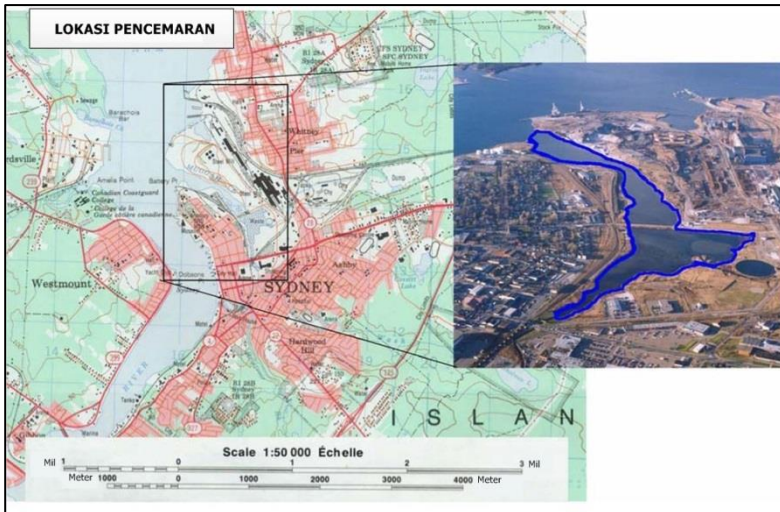
Kasus yang dibahas pada subbab ini adalah kasus remediasi kolam tar tercemar logam berat, PAHs, PCBs, VOCs di Sydney, Nova Scotia, Kanada. Kolam tar Sydney mencakup area seluas sekitar 33 hektar. Upaya remediasi dilakukan sejak 12 Mei 2004.

4.1.1. Gambaran Umum

Remediasi kolam tar Sydney memiliki sejarah yang luas sejak tahun 1980. Proyek remediasi ini adalah proyek yang paling terkemuka di Kanada. Kolam tar ini terbentuk di muara pasang surut yang terletak di mulut Muggah Creek, sebuah aliran air tawar yang bermuara di pelabuhan. Lokasi kolam tar Sydney dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Kolam tar ini terbentuk akibat kegiatan produksi baja dan batubara yang sudah berlangsung hampir 100 tahun. Kegiatan produksi baja dan batubara ini menghasilkan limbah yang juga mengandung logam berat (As, Cd, Cu, Pb, Hg, dan Zn) yang termigrasi menuju sungai. Terdapat dua anak sungai yang berpengaruh signifikan terhadap keberadaan kolam tar, yaitu anak sungai Wash Brook dan Coke Oven Brook. Kedua anak sungai ini mengalirkan aliran sungai dari perkotaan ke kolam tar. Kolam tar Sydney terdiri dari dua bagian, yaitu bagian utara dan selatan.

Lebih dari 100 tahun kegiatan pembuatan baja dan industri batubara di Sydney mengakibatkan deposisi tar batubara, batubara halus, dan sedimen di dalam kolam. Sebagian besar sedimen di kolam tar terbawa oleh anak sungai Coke Oven Brook. Kontaminan yang terkandung dalam sedimen terdiri atas logam berat, *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs), *volatile organic compounds* (VOC) dan *polychlorinated biphenyls* (PCBs).

Keseluruhan pekerjaan yang dibutuhkan untuk meremediasi kolam tar Sydney sangat banyak, kompleks dan tersebar di area yang luas. Terdapat 13 sub proyek untuk memudahkan pengelolaan proyek remediasi ini. Stabilisasi/solidifikasi kolam tar Sydney merupakan elemen dengan lingkup dan anggaran dana terbesar (Noble dan MacDonald, 2011).



Gambar 4. 1 Lokasi Kolam Tar di Sydney Nova Scotia, Kanada
Sumber: AECOM, 2008



Gambar 4. 2 Lokasi Kolam Tar dan Coke Oven
Sumber: Noble dan MacDonald, 2011
Tanpa Skala

4.1.2. Perencanaan Solusi

Upaya remediasi yang berhasil diterapkan untuk sedimen kolam tar adalah stabilisasi/solidifikasi secara *in situ* dengan semen. Saluran buatan akan dibangun melalui kolam tar untuk mengalirkan air dari anak sungai Coke Oven Brook dan Muggah Creek menuju pelabuhan Sydney. Setelah S/S selesai, area kolam tar akan ditutup dengan penutup. Agar proses S/S dalam kondisi kering, dibangun sistem manajemen pengendalian air untuk mengendalikan intrusi air dari laut dan memompa arus yang masuk di sekitar area kerja secara berurutan.

4.1.3. Remediasi

4.1.3.1 Pekerjaan Pra S/S

Sebelum S/S diterapkan pada kolam tar utara dan selatan, ada beberapa pekerjaan yang harus dilakukan termasuk pembangunan jalan akses di sepanjang kolam. Menurut US EPA (2012) S/S secara *in situ* melibatkan alat berat untuk menambahkan dan mencampur bahan aditif ke dalam tanah. Selain itu ekskavator, *dozer*, *loader*, sistem pemompaan dan alat pendukung lain juga dibutuhkan untuk menjalankan kegiatan S/S secara *in situ*. Oleh karena itu dibutuhkan pembangunan jalan akses di sepanjang kolam. Stabilisasi/solidifikasi dilakukan dalam skala Adanya air pada kolam tar akan mempengaruhi hasil stabilisasi/solidifikasi. Oleh karena itu dibutuhkan dua pekerjaan pokok yang harus dilakukan sebelum kegiatan S/S dimulai, diantaranya uji kelayakan serta pengeringan area kerja S/S.

A. Uji Kelayakan

Sebelum S/S diterapkan langsung pada kolam tar yang terkontaminasi, diperlukan uji kelayakan terlebih dahulu dalam skala laboratorium. Terdapat dua pengujian dalam proyek remediasi ini, yaitu uji coba *bench-scale* dan uji *pilot study*. Dalam S/S diperlukan bahan pengikat yang mampu mengurangi sifat beracun limbah dan dapat mengurangi laju migrasi kontaminan ke lingkungan. Uji coba *bench-scale* diperlukan untuk menentukan campuran bahan pengikat yang digunakan. Uji *pilot study* diperlukan untuk menguji parameter desain dari campuran bahan pengikat. Produk stabilisasi/solidifikasi harus mampu

menahan beban dan stabil (Paria dan Yuet, 2006; Spence dan Shi, 2005). Maka parameter desain yang diujikan adalah kuat tekan.

Sebagai bagian dari uji coba *bench-scale*, sejumlah sampel sedimen dikumpulkan dari kolam tar bagian utara dan selatan. Di laboratorium, sampel sedimen dicampur dengan reagen S/S yang potensial seperti semen, *slag* dan/atau abu terbang. Reagen tersebut merupakan reagen yang mudah didapatkan disekitar area S/S. *Slag* dan abu terbang merupakan hasil samping dari industri baja yang pernah ada disekitar lokasi studi. Tujuan dari uji coba *bench-scale* adalah untuk menemukan campuran reagen dan sedimen yang dapat memenuhi kriteria kinerja S/S di laboratorium. Dengan memanfaatkan informasi yang diperoleh dari uji coba *bench-scale*, proyek percontohan (*pilot study*) dilaksanakan. Proyek percontohan dilakukan dengan cara membuat sel-sel yang terbuat dari lapis baja. Sel-sel ini saling berdekatan dan terletak di kolam tar utara dan selatan. S/S akan dilakukan pada setiap sel dengan bahan pengikat yang berbeda setiap sel. Tujuh sel dibangun di kolam tar selatan dan enam sel dibangun di kolam tar utara. Masing-masing sel memiliki luas permukaan sebesar 27 m². Setelah reagen dalam sel dihomogenkan dengan ekskavator, sejumlah kombinasi semen, *slag* dan/atau abu terbang yang sudah diketahui kemudian dicampur dengan sedimen pada sel. Pengadukan reagen dalam sel dapat dilihat pada Gambar 4.3. Setelah pencampuran, sampel diambil dan dianalisis untuk menemukan hasil yang diinginkan. Hasil uji *pilot study* mengindikasikan bahwa ada sejumlah variasi reagen yang berpotensi memenuhi kriteria kinerja yang diharapkan. Kuantitas bahan pengikat yang digunakan untuk S/S pada kolam tar bagian utara dan selatan dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan 4.2. Bahan pengikat dinyatakan dalam % berat sedimen di dalam sel.

Tabel 4. 1 Kuantitas Bahan Pengikat untuk S/S Kolam Tar Bagian Utara

Sel	Bahan Pengikat yang Digunakan
1	12% semen
	5% <i>slag</i>
2	14,5% semen

Sel	Bahan Pengikat yang Digunakan
	10% <i>slag</i>
3	5,5% abu terbang
	12% semen
	10% <i>slag</i>
4	10% abu terbang
	5% semen
5	20% <i>slag</i>
	12% semen
6	10% <i>slag</i>
	7,5% semen
6	10% <i>slag</i>

Sumber: AECOM, 2009

Tabel 4. 2 Kuantitas Bahan Pengikat untuk S/S Kolam Tar Bagian Selatan

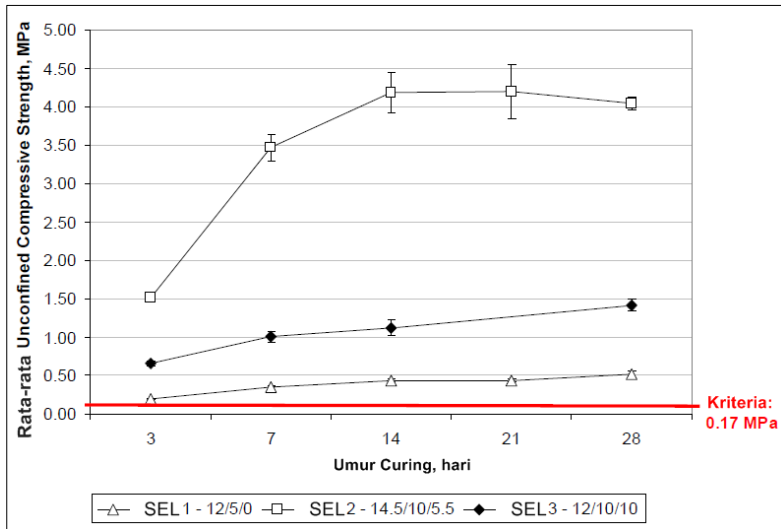
Sel	Bahan Pengikat yang Digunakan
1	15% semen
	10% <i>slag</i>
2	15% semen
	10% <i>slag</i>
	10% abu terbang
3	20% semen
4	10% semen
	10% <i>slag</i>
	5% abu terbang
5	7,5% semen
	10% <i>slag</i>
6	5% semen
	5% <i>slag</i>
7	12% semen
	5% <i>slag</i>

Sumber: AECOM, 2009



Gambar 4. 3 Uji Coba Lapangan untuk Menentukan Komposisi Campuran
Sumber: Larkin, 2008

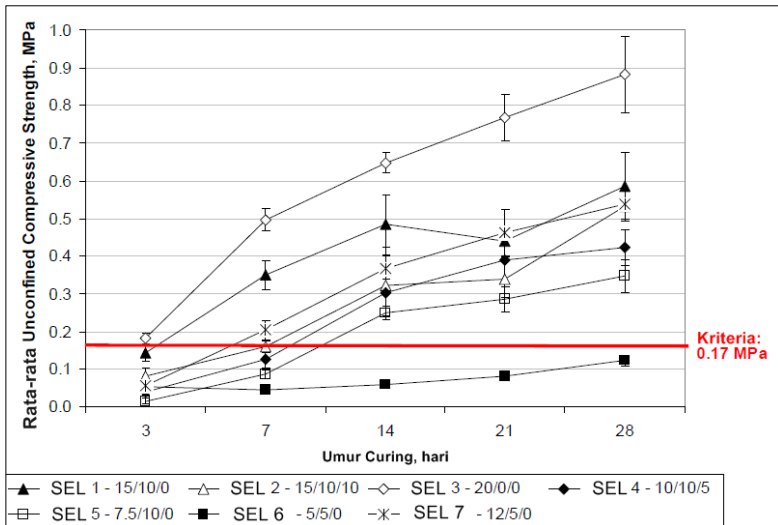
Selanjutnya setiap sel diuji kuat tekan dengan metode *unconfined compressive strength* (UCS) dengan kriteria $\geq 0,17$ MPa (25 psi). Dua sampel dikumpulkan pada tiap sel, masing-masing diambil dari bagian atas dan bagian bawah sedimen. Setiap sampel diuji kuat tekan kemudian dirata-rata. Hasil uji kuat tekan dapat dilihat pada gambar 4.4 dan 4.5.



Gambar 4. 4 Hasil Uji Kuat Tekan Sampel Kolam Tar Sydney Bagian Utara

Sumber: AECOM, 2009

Hasil uji kuat tekan kolam tar Sydney bagian utara pada sel 4, 5, 6 tidak mencapai kriteria kuat tekan dikarenakan spesimen mengandung terlalu banyak kadar air dikarenakan sampel yang terlewati aliran sungai, bukan karena campuran kandungan bahan solidifikasi. Hasil uji kuat tekan kolam tar Sydney bagian selatan menunjukkan pada sel 6 dengan komposisi bahan pengikat 5% semen, 5% *slag*, dan 0% abu terbang tidak mampu memenuhi kriteria. Nilai kuat tekan bagian atas dan bagian bawah sedimen masing-masing sebesar 0,11 dan 0,13 MPa (AECOM, 2009).



Gambar 4. 5 Hasil Uji Kuat Tekan Sampel Kolam Tar Sydney Bagian Selatan

Sumber: AECOM, 2009

Hasil uji kuat tekan sampel kolam tar Sydney bagian selatan menunjukkan bahwa bahan pengikat yang diterapkan pada sel 6 (5% semen *portland*, 5% *slag*) tidak mencapai kriteria kuat tekan. Hasil tersebut dikarenakan jumlah persentase komposisi campuran bahan pengikat pada sel 6 yang terlalu sedikit dibandingkan dengan campuran bahan pengikat pada sel lain. Sehingga komposisi kimia yang terkandung pada campuran bahan pengikat pada sel 6 juga belum cukup untuk mengikat dan merekatkan sampel yang disolidifikasi.

Menurut Wiryasa dan Sudarsana (2009) komposisi kimia semen yang lengkap dan sesuai digunakan sebagai bahan pengikat, yaitu CaO , SiO_2 , dan Al_2O_3 yang tinggi yang masing-masing berfungsi sebagai perekat, *filler*, dan mempercepat proses pengerasan. Sehingga semakin banyak komposisi semen *portland* akan menghasilkan hasil kuat tekan yang baik.

B. Pengerinan Area Kerja untuk S/S

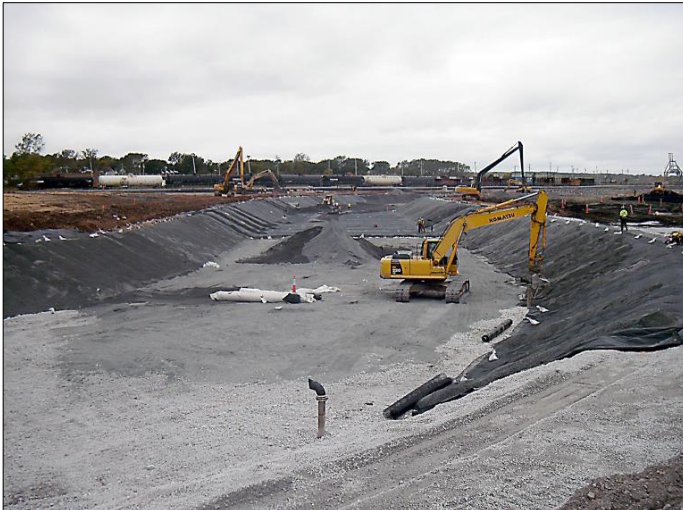
Menurut Scanferla *et al.* (2009) air laut yang mengandung senyawa agresif seperti klorida dan ion sulfat dapat berdampak buruk pada daya tahan material yang distabilisasi. Lokasi kolam tar Sydney terbentuk di muara pasang surut. Oleh karena itu diperlukan pengerinan area kerja agar S/S tidak terganggu oleh adanya air di atas sedimen.

Untuk mengontrol aliran air permukaan masuk ke kolam tar, dibutuhkan sebuah sistem yang mengalirkan aliran dari anak sungai Wash Brook dan anak sungai Coke Oven menuju Pelabuhan Sydney. Sebagai salah satu langkah pertama remediasi, akan dibangun sebuah sistem kanal yang menuju kolam tar. Sedimen sepanjang kanal akan digali dan diolah dengan S/S. Sebuah lapisan penutup akan dipasang dibawah kanal dan ditimbun kembali dengan batu pecah. Gambar pemasangan lapisan penutup untuk konstruksi kanal dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7. Lapisan penutup akan membantu migrasi kontaminan ke saluran yang dibersihkan. Pada mulanya desain pengerinan melibatkan pemompaan 2 sungai di sekitar kolam tar selatan dengan arus yang dialirkan ke kolam tar utara. Setelah arus dialihkan, pemompaan air yang tersisa di atas sedimen menjadi tanggung jawab kontraktor S/S. Setelah menyelesaikan S/S pada kolam tar selatan dan pembangunan saluran, infrastruktur pemompaan akan dipindah untuk mengeringkan kolam tar utara. Stasiun pompa merupakan sebuah kombinasi pompa elektrik dan diesel yang harus mampu mengatasi arus puncak sebesar 14 m³ per detik. Pengerinan kolam tar dengan sistem pemompaan dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9.



Gambar 4. 6 Lapisan Penutup Dibawah Kanal Ditimbun Kembali dengan Batu Pecah

Sumber: MacNeil *et al.*, 2012



Gambar 4. 7 Pemasangan Lapisan Penutup untuk Konstruksi Kanal

Sumber: MacNeil *et al.*, 2012



Gambar 4. 8 Sistem Pemompaan untuk Mengalihkan Aliran Agar Tidak Memasuki Kolam Tar
 Sumber: MacNeil *et al.*, 2012



Gambar 4. 9 Pengeringan Bagian Selatan Kolam Tar Sydney
 Sumber: AECOM, 2008

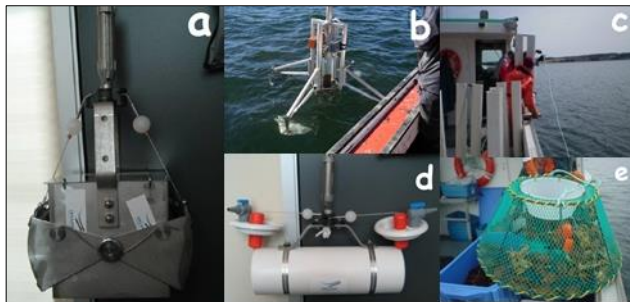
4.1.3.2 Stabilisasi/Solidifikasi

Setiap sel dicampur dengan menggunakan ekskavator hidrolis untuk mencampur bahan solidifikasi seperti semen *portland* dan *slag* (Gambar 4.10). Bahan solidifikasi yang digunakan adalah bahan pilihan yang sudah di uji dalam *pilot testing*. Remediasi dengan S/S dilakukan dengan cara *in situ*.



Gambar 4. 10 Pencampuran Bahan Solidifikasi dan Sedimen Kolam Tar Sydney dengan Menggunakan Ekskavator
Sumber : MacNeil *et al.*, 2012

Setelah S/S dilakukan, dilakukan upaya pemantauan kualitas lingkungan. Tujuan pemantauan lingkungan adalah untuk mengukur efisiensi dan efektivitas pengelolaan lingkungan yang dilakukan. Terdapat 3 objek monitoring yang dilakukan, yaitu sedimen permukaan, kualitas air, dan *biota sampling*. Gambar peralatan sampling dapat dilihat pada Gambar 4.11



Gambar 4. 11 Peralatan Sampling Sedimen Menggunakan *Ekman Grab* (a) dan *Gravity Corer* (b), Pengambilan Sedimen dengan Perahu (c), Tabung untuk Mengambil Sampel Air (d) dan Pengambilan Sampel Kepiting (e)
Sumber: Walker, 2016

Terdapat 4 wilayah pemantauan kualitas sedimen permukaan dengan parameter pemantauan kadar logam berat dan total PAH. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hasil remediasi dengan menggunakan S/S yang mampu menurunkan kelarutan dan imobilisasi kontaminan dalam sedimen kolam tar Sydney. Parameter yang diuji dapat dilihat pada Tabel 4.3. Pemantauan dilakukan sejak tahun 2009 (Pra S/S) dan 3 tahun remediasi (2010, tahun 1; 2011, tahun 2; 2012, tahun 3). Gambar 4.12 menunjukkan lokasi titik pemantauan.

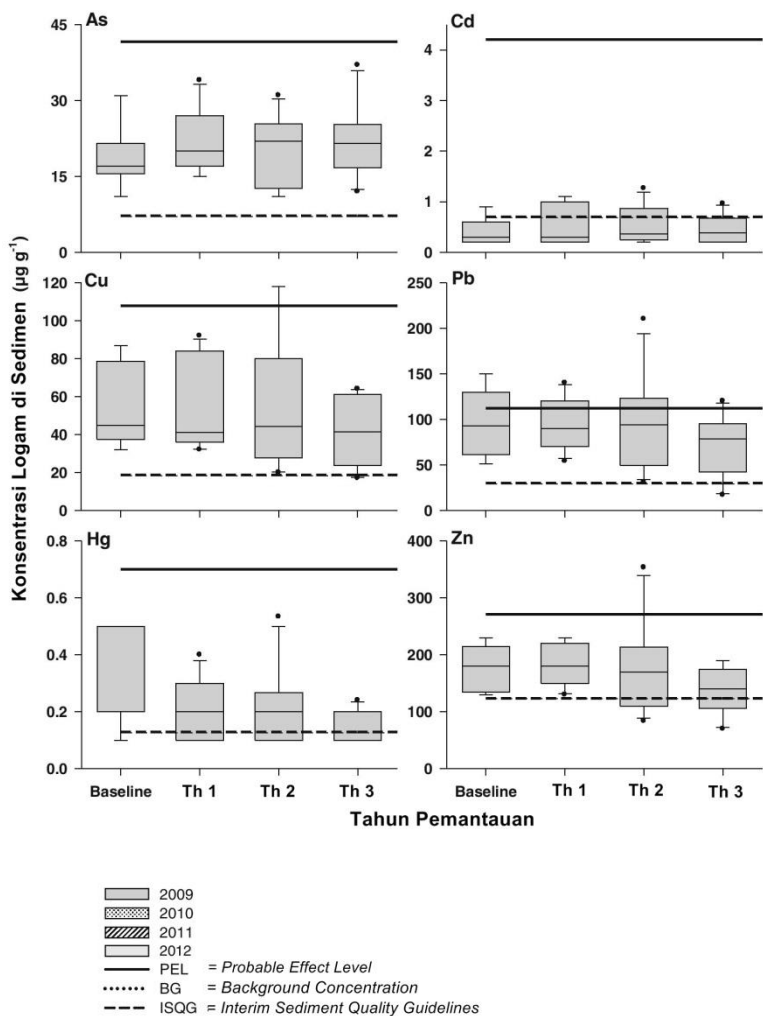


Gambar 4. 12 Lokasi Titik Pemantauan
Sumber: Walker, 2016

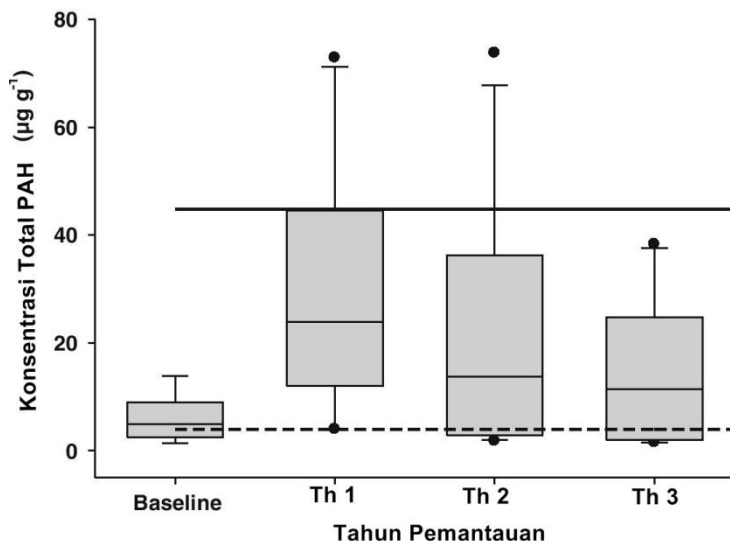
Hasil pemantauan konsentrasi logam berat pada sedimen permukaan sebagai aktivitas remediasi pada kolam tar Sydney dapat dilihat pada Gambar 4.13. Apabila terjadi perbedaan yang signifikan, konsentrasi logam berat lebih rendah daripada konsentrasi logam berat yang terukur pada tahun 2009 (Pra S/S).

Namun terjadi kenaikan kecil konsentrasi logam berat As dan Cd dari tahun 2009 ke 2010, kemudian menurun pada tahun pertama ke tahun kedua remediasi. Konsentrasi logam berat As ($23 \mu\text{gg}^{-1}$) dan Cd ($0,8 \mu\text{gg}^{-1}$) dibawah baku mutu PEL dan mendekati konsentrasi alamiah As ($20 \mu\text{gg}^{-1}$) dan Cd ($0,4 \mu\text{gg}^{-1}$) di alam (*background concentration*). Arsen merupakan zat yang secara alami ada pada batuan, tanah dan sedimen di provinsi Nova Scotia, itulah mengapa rata-rata konsentrasi As tiap tahun hampir sama di setiap titik sampling. Hampir seluruh konsentrasi logam pada sedimen dibawah baku mutu PEL, kecuali logam berat Pb pada titik sampling 1-1, 1-2, 1-3, dan 4-1, Cu pada titik 1-4 di tahun 2011, Zn pada titik 1-2 dan 1-4 selama tahun 2011. Hampir seluruh titik sampling melampaui baku mutu logam berat menurut ISQG kecuali konsentrasi logam berat Cd. Namun konsentrasi logam pada sedimen di lokasi remediasi kolam tar Sydney lebih rendah dari *background concentration* atau konsentrasi alamiah untuk sedimen pesisir di provinsi Nova Scotia (Walker *et al.*, 2013).

Gambar 4.14 menyatakan variasi konsentrasi total PAH pada kawasan remediasi kolam tar Sydney. Kenaikan konsentrasi total PAH pada sedimen selama remediasi bisa terjadi dikarenakan pelepasan PAH di lokasi akibat aktivitas remediasi, namun lebih terlokalisasi pada titik 1. Peningkatan konsentrasi PAH khususnya pada tahun 1 (2010) dikarenakan resuspensi sedimen yang terkontaminasi akibat badai besar. Hasil konsentrasi PAH saat *baseline* (2009) dinyatakan rendah karena penguburan sedimen yang tidak terkontaminasi selama aktivitas badai besar yang terjadi diantara tahun 2009-2010. Namun, total konsentrasi PAH selama tahun 1 (2010) lebih rendah dibandingkan dengan tingkat historis. Pengukuran konsentrasi total PAH pada tahun 2011 dan 2012 menunjukkan hasil yang lebih rendah dari tahun 2010, namun tetap berbeda secara signifikan dari konsentrasi awal (2009), walaupun perubahan ukuran butir yang diamati pada area 2 stasiun mendukung kemungkinan resuspensi akibat badai (Walker *et al.*, 2013). Secara keseluruhan, konsentrasi total PAH pada sedimen permukaan di kolam tar Sydney selama 2009 -2012 ($1,4 - 73,8 \mu\text{gg}^{-1}$) lebih rendah dari *background concentration* pada tahun 1960 – 1980 ($200 - 500 \mu\text{gg}^{-1}$).



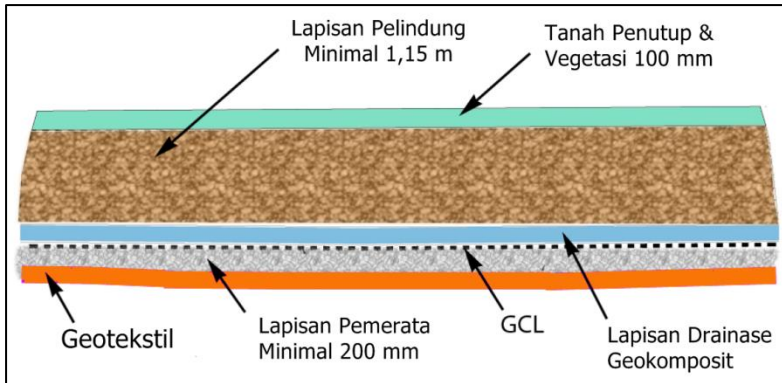
Gambar 4. 13 Variasi Konsentrasi Logam Berat pada Sedimen Permukaan Kolam Tar Sydney
Sumber: Walker, 2013



Gambar 4. 14 Variasi Konsentrasi Total PAH pada Sedimen Permukaan Kolam Tar Sydney
Sumber: Walker, 2013

4.1.4. Penutupan dan Penggunaan Lokasi di Masa Depan

Upaya remediasi selesai pada 16 Januari 2013 dengan total sebanyak 679,016 m³ sedimen yang diolah. Setelah menyelesaikan kegiatan S/S, material S/S ditutup dengan penutup yang memiliki permeabilitas rendah. Tujuan penutupan adalah untuk mengalirkan air permukaan dari monolit S/S untuk mencegah infiltrasi air ke dalam monolit S/S (US EPA, 2000). Penutup kolam tar akan mengkapsulasi sedimen yang diolah dengan S/S. Lapisan penutup akan tersusun atas kombinasi geotekstil, lempung, lapisan pelindung. Gambar desain lapisan penutup dapat dilihat pada Gambar 4.15. Lapisan drainase komposit memiliki tebal minimal 35 cm. Lapisan pelindung tersusun atas tanah dengan ketebalan minimal 1,15 m.



Gambar 4. 15 Lapisan Penutup Kolam Tar Sydney
Sumber: Larkin, 2008

Lapisan penutup dibangun untuk mencegah infiltrasi air mencapai lapisan monolit hasil S/S sedimen dan melindunginya dari masuknya kontaminan. Lapisan penutup yang kedap memiliki konduktivitas hidrolis sebesar 10^{-7} cm/s (MacNeil *et al.*, 2012). Gambar pemasangan lapisan penutup dan hasil akhir penutupan dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan 4.17.

Lokasi yang sudah diremediasi selanjutnya digunakan sebagai taman yang bernama Open Heart Park yang dilengkapi dengan jaringan jalan dan jembatan. Gambar Open Heart Park dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 16 Konstruksi Lapisan Penutup di Lokasi Remediasi Kolam Tar Sydney

Sumber : MacNeil *et al.*, 2012



Gambar 4. 17 Hasil Akhir Penutupan Lokasi Remediasi Kolam Tar Sydney

Sumber : MacNeil *et al.*, 2012



Gambar 4. 18 Open Heart Park bekas Kolam Tar Sydney
Sumber: AECOM, 2008

Upaya pemantauan lingkungan dilakukan sejak sebelum remediasi hingga 3 tahun sesudah remediasi berjalan. Setelah upaya remediasi selesai, dilakukan upaya pemantauan lingkungan pasca remediasi di titik sampling yang sama (Gambar 4.11). Tujuan pemantauan lingkungan adalah untuk mengukur efisiensi dan efektivitas pengelolaan lingkungan yang dilakukan. Terdapat 3 objek monitoring yang dilakukan, yaitu sedimen permukaan, kualitas air, dan *biota sampling*.

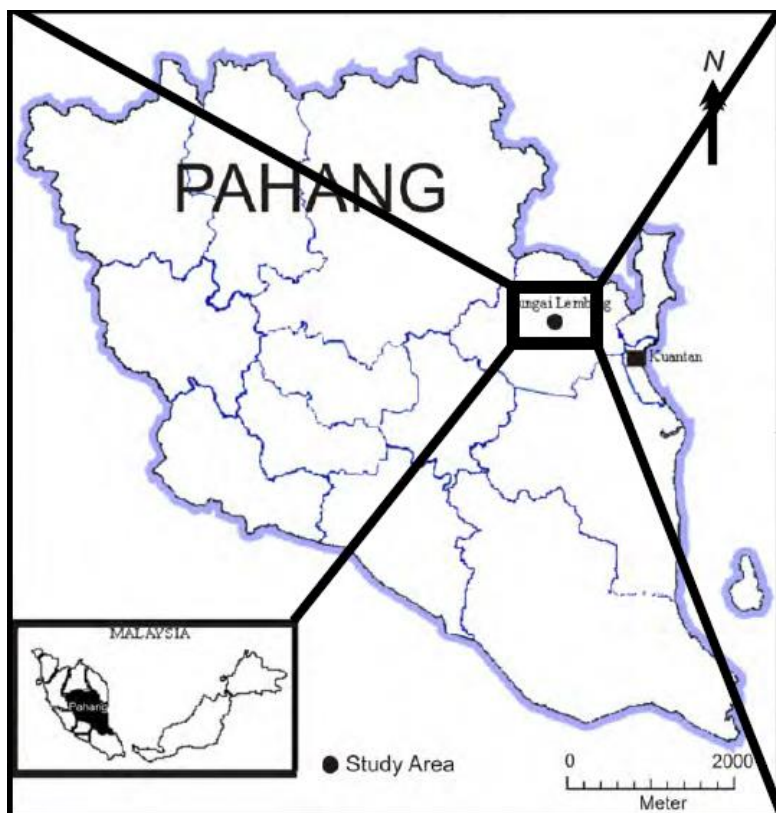
4.2 Kasus Pencemaran Logam Berat di Sungai Lembing, Malaysia

Kasus yang dibahas pada subbab ini adalah kasus pencemaran tanah oleh multi-logam berat di kawasan bekas tambang timah Sungai Lembing, Malaysia. Pada lokasi ini belum diterapkan teknologi stabilisasi/solidifikasi untuk meremediasi pencemaran tanah yang terjadi. Pada subbab ini akan dibahas gambaran umum lokasi pencemaran sehingga dapat diketahui upaya remediasi yang dapat diterapkan di lokasi ini.

4.2.1. Gambaran Umum

Kawasan bekas tambang timah Sungai Lembing merupakan kawasan tambang timah yang sudah beroperasi selama 80 tahun. Kawasan ini terletak di Provinsi Pahang, Malaysia. Kawasan ini dulunya merupakan kawasan tambang timah terbesar di dunia (Ahmad dan Al-Mahaqori, 2014). Kawasan ini

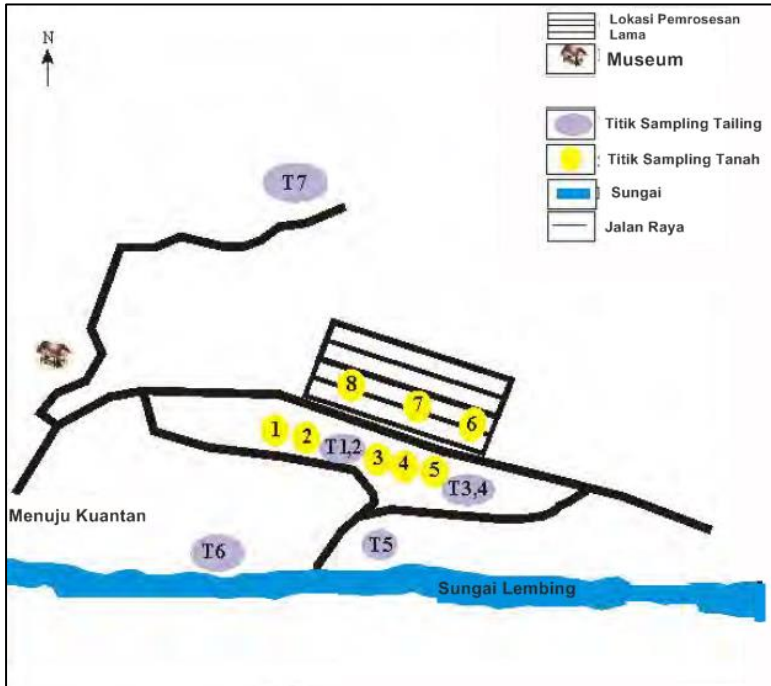
sekarang dibiarkan dan ditinggalkan. Selama aktif tambang timah ini telah banyak menghasilkan limbah B3 mengandung berbagai macam logam berat dengan konsentrasi tinggi. Logam berat (As, Pb, Zn, Cu, Cr, dan Ni) terkandung dalam *tailing* dan termigrasi ke lingkungan. Migrasi logam berat ke lingkungan menyebabkan kontaminasi yang luas pada tanah, air permukaan, air tanah, dan sungai.



Gambar 4. 19 Peta Lokasi Tambang Timah Sungai Lembing

Pada bulan April 2008, sampel tanah terkontaminasi diambil pada kedalaman 50 cm, 100 cm, dan 150 cm. Sedangkan sampel *tailing* diambil pada bagian permukaannya. Terdapat 8

titik sampling untuk tanah tercemar (SL) dan 7 titik sampling untuk *tailing* (T). Lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 4.20. Sampel yang diambil kemudian diuji kandungan logam beratnya.



Gambar 4. 20 Lokasi Pengambilan Sampel *Tailing* dan Tanah di Kawasan Tambang Sungai Lembang
Sumber : Alshaebi *et al.*, 2009

Rata-rata nilai logam berat pada sampel dibandingkan dengan baku mutu *dutch list*, *kelly indices*, dan *soil quality guidelines* (SQG). Ketiganya merupakan baku mutu yang masing-masing berasal dari Inggris, London, dan Kanada. Konsentrasi logam berat pada sampel tanah tercemar dapat dilihat pada Tabel 4.3. Sedangkan konsentrasi logam berat pada sampel *tailing* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 3 Konsentrasi Logam Berat pada Tanah Tercemar di Kawasan Sungai Lembing

Lokasi	Konsentrasi Logam Berat (mg/kg)					
	As	Pb	Ni	Zn	Cu	Cr
SL1	13643,6	250311,3	225351,3	205396	247720,6	101,7
SL2	31680,03	160073,2	144991,7	139839,1	148669,1	142,8
SL3	13817,4	158107,6	145130,2	146285,6	157207,1	104,4
SL4	14302,6	155837,1	145521,7	160672,5	183539,1	104,1
SL5	6096,2	150997,9	142814,9	141578,1	145840,3	108,9
SL6	4906,9	149928,8	141019,9	136688,3	142879,8	102,7
SL7	2009,6	150354,9	140097,3	125886,5	142420	110,5
SL8	941,1	149740,3	140059,9	131537,4/	141545,3	205,2
Dutch List	55	530	210	720	190	380
Kelly Indices	50	500	50	500	200	200
SQG	12	70	50	200	63	64

Tabel 4. 4 Konsentrasi Logam Berat pada *Tailing* Tambang Timah Sungai Lembing

Lokasi	Konsentrasi Logam Berat (mg/kg)					
	As	Pb	Ni	Zn	Cu	Cr
T1	627,88	148083,9	140835	127137,3	143081,7	106,4
T2	531,8	151839,3	141204	127177,8	141866,4	110,08
T3	354,2	147363,3	139934	123358,4	141050,6	106
T4	880,04	147515,5	139170	124929,1	141265,1	101,8
T5	4086,2	149233,2	138652	127344,8	150710,1	96,04
T6	3020,24	149784,6	140387	129326,7	150878,3	103,52
T7	4332,12	141555,8	133627	124981,1	147459,4	106,84

Seluruh konsentrasi logam berat pada tanah tercemar telah melebihi baku mutu SQD. Pada tanah tercemar di Sungai Lembing hanya konsentrasi logam berat kromium yang tidak melebihi baku mutu *dutch list* dan *kelly indices*.

4.2.2. Upaya Konservasi

Setelah kegiatan pertambangan di Sungai Lembing ditutup, tidak ada langkah-langkah pemeliharaan dan remediasi yang dilakukan. Pemerintah Pusat Pahang memajukan kawasan ini sebagai kawasan pariwisata. Upaya pemerintah yang dilakukan yaitu membangun sebuah museum tambang dan

melakukan kajian dan pengelolaan terowongan bekas yang digunakan dalam kegiatan tambang. Bekas terowongan dibangun pondasi dari beton. Hal ini bertujuan untuk menjaga kestabilan tanah di sekitar lokasi bekas tambang (Arifin *et al.*, 2010).

4.3 Kasus Pencemaran Merkuri di Kulon Progo, Indonesia

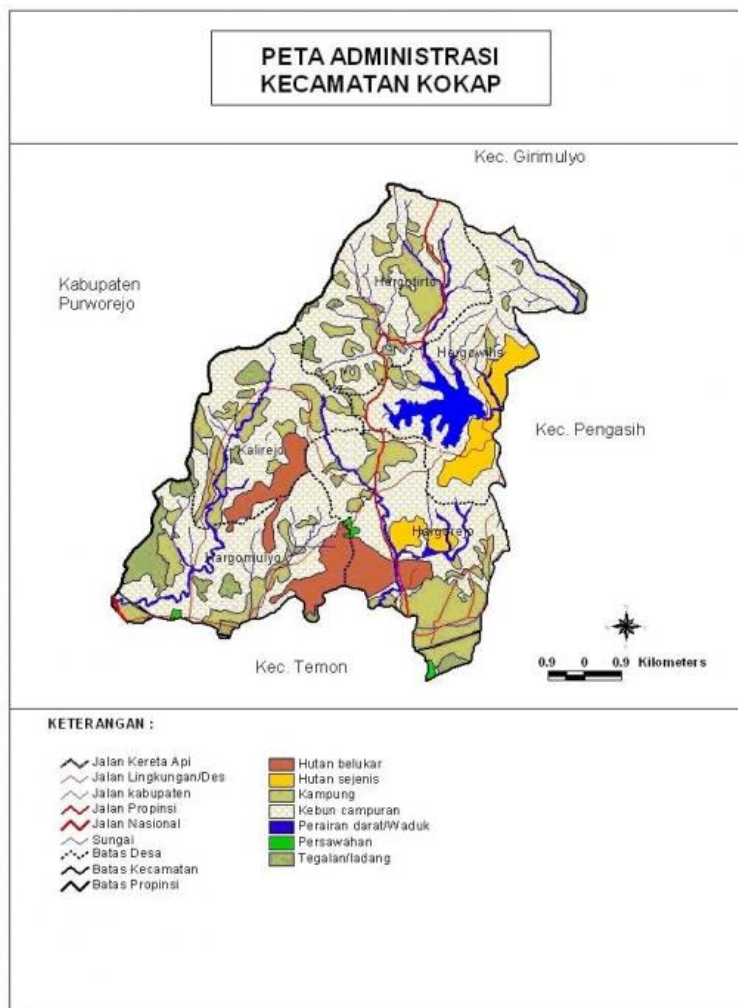
Kasus yang dibahas pada subbab ini adalah kasus pencemaran tanah oleh logam berat merkuri di kawasan tambang emas rakyat Sangon, Kulon Progo Yogyakarta. Pada lokasi ini belum diterapkan teknologi stabilisasi/solidifikasi untuk meremediasi pencemaran tanah yang terjadi. Pada subbab ini akan dibahas gambaran umum lokasi pencemaran sehingga dapat diketahui upaya remediasi yang dapat diterapkan.

Kawasan tambang Sangon merupakan kawasan pertambangan emas rakyat dengan cara konvensional. Pertambangan emas rakyat ini menggunakan teknik amalgamasi. Teknik amalgamasi adalah teknik pencampuran serbuk pasir dengan merkuri membentuk amalgam (*alloy*) yang digunakan sebagai pengikat emas. Pengolahan emas dengan cara amalgamasi telah menyebabkan kontaminasi merkuri pada tanah. Usaha penambangan emas di kawasan Sangon telah berlangsung sejak tahun 1990-an.

Secara administratif kawasan Sangon terletak di Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewah Yogyakarta. Peta lokasi kawasan Sangon dapat dilihat pada Gambar 4.21.

Pencemaran tanah oleh merkuri terjadi di sekitar lokasi penggilingan bijih dengan gelundung. Tanah ditambang dilokasi penambangan kemudian dibawa ke lokasi penggilingan yang letaknya terpisah dengan lokasi tambang (Setiabudi, 2005). Pengolahan di gelundung ini menghasilkan limbah berupa *tailing* yang mengandung merkuri (Hg) dari proses amalgasi emas (Pamayo, 2016). Hasil uji kadar total merkuri pada sampel tanah tercemar adalah 892,53 µg/kg atau setara dengan 0,89 mg/kg (Anisa, 2016). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 nilai baku mutu karakteristik beracun melalui total konsentrasi untuk penetapan pengelolaan tanah terkontaminasi limbah B3 adalah total konsentrasi A (TK-A) sebesar 300 mg/kg, TK-B sebesar 75 mg/kg, dan TK-C sebesar

0,3 mg/kg. Tanah tambang emas Kulon Progo, Yogyakarta dinyatakan tercemar merkuri dikarenakan melebihi baku mutu TK-C.



Gambar 4. 21 Peta Administrasi Kecamatan Kokap
Sumber : Badan Pusat Statistik, 2016



Gambar 4. 22 Kolam Penampungan Tailing di Kecamatan Kokap
Sumber: Setiabudi, 2005



Gambar 4. 23 Pembuangan *Tailing* di Sekitar Lokasi Gelundung
Sumber: Setiabudi, 2005

4.4 Ulasan Penanganan Tanah Tercemar Limbah B3 di Lokasi Studi Kasus

Pada subbab ini akan dibahas perbandingan penanganan tanah tercemar limbah B3 setiap studi kasus serta rekomendasi teknologi penanganan tanah tercemar limbah B3 pada lokasi studi kawasan tambang Sangon, Indonesia dan kawasan bekas tambang Sungai Lembing, Malaysia.

4.4.1. Perbandingan Penanganan Tanah Tercemar Limbah B3

Dari ketiga studi kasus memiliki kegiatan penanganan tanah tercemar yang berbeda. Tabel 4.5 menampilkan komparasi penanganan tanah tercemar limbah B3 dari studi kasus yang sudah dibahas.

Tabel 4. 5 Komparasi Penanganan Tanah Tercemar Limbah B3 di Lokasi Studi Kasus

Kegiatan	Negara Maju	Negara Berkembang	
	Kanada	Malaysia	Indonesia
Monitoring kualitas lingkungan	Monitoring dilakukan sebelum kegiatan remediasi dan 3 tahun saat berjalannya kegiatan remediasi.	Telah dilakukan penilaian kualitas tanah dan <i>tailing</i> .	Belum dilakukan.
Aplikasi teknologi S/S	Diaplikasikan secara <i>in situ</i>	Belum dilakukan.	Belum dilakukan.
Monitoring pasca aplikasi metode S/S	Dilakukan dengan melanjutkan metode monitoring sebelumnya.	Belum dilakukan.	Belum dilakukan.
Keterlibatan pemerintah	Terlibat dalam proyek remediasi.	Belum terlibat.	Belum terlibat.

Kasus kolam tar Sydney yang terletak di Kanada, merupakan kasus dengan upaya remediasi yang terbilang sukses. Monitoring kualitas lingkungan dilakukan sebelum dan sesudah kegiatan remediasi. Objek monitoring yang dilakukan yaitu sedimen permukaan, kualitas air, dan biota air. Kegiatan remediasi yang dilakukan dengan menggunakan S/S secara *in situ* dengan teknis lapangan yang baik. Penanganan kadar air sedimen dengan cara pengeringan area kerja dengan sistem pemompaan dan kanal. Pengendalian bau dan gas menggunakan *foam* yang disemprotkan selama proses remediasi.

Kasus pencemaran tanah pada kawasan tambang Sungai Lembing, Malaysia belum mendapatkan upaya remediasi. Penilaian kualitas tanah dan *tailing* sudah dilakukan dengan logam berat sebagai parameter yang dipantau. Pemerintah Pusat Pahang terlibat dalam memajukan kawasan tambang menjadi kawasan pariwisata. Upaya yang dilakukan yaitu membangun museum tambang dan melakukan kajian pengelolaan terowongan bekas tambang.

Kasus pencemaran tanah di tambang emas rakyat Sangon, Kulon Progo belum mendapatkan upaya remediasi dan upaya pemantauan kualitas lingkungan. Belum ada keterlibatan

pemerintah untuk melakukan upaya remediasi. Diperlukan beberapa strategi pengendalian pencemaran tanah di kawasan ini sebelum melakukan upaya remediasi. Penutupan kegiatan penambangan perlu dilakukan dikarenakan kegiatan penambangan belum memiliki izin dan diolah oleh rakyat. Penerapan regulasi tentang tambang emas rakyat perlu dilakukan.

4.4.2. Rekomendasi Teknologi Penanganan Tanah Tercemar Limbah B3

Kasus pencemaran tanah pada kawasan tambang Sungai Lembing dan Sangon belum mendapatkan upaya remediasi. Pada subbab ini akan dibahas rekomendasi teknologi penanganan tanah yang dapat diterapkan. Adapun tahapan-tahapan yang dapat dilakukan adalah:

1. Survei lokasi dan identifikasi karakteristik pencemar
2. Pemilihan metode S/S
3. Studi kelayakan
4. Pengolahan tanah tercemar
5. Penutupan

4.4.2.1 Rekomendasi Penanganan Tanah Tercemar di Kawasan Tambang Sungai Lembing

A. Pemilihan Metode Stabilisasi/Solidifikasi

Terdapat dua metode penerapan S/S untuk remediasi tanah tercemar, yaitu secara *in situ* dan *ex situ*. Metode yang disarankan untuk digunakan dalam remediasi tanah tercemar merkuri di kawasan tambang timah Sungai Lembing adalah S/S secara *in situ*. Hal ini dikarenakan kawasan tambang timah Sungai Lembing merupakan kawasan tambang timah yang sudah lama ditinggalkan dan letak tambang jauh dari pemukiman (Ahmad dan Al-Mahaqori, 2014).

Dalam S/S secara *in situ* tidak membutuhkan penggalian atau pemindahan. Tanah yang terkontaminasi diolah ditempat sehingga tidak membutuhkan tempat pengolahan terpisah. Dalam S/S secara *in situ* tidak mempertimbangkan pengangkutan logistik.

B. Studi Kelayakan

Studi kelayakan diperlukan untuk membuktikan kemampuan S/S dalam mengolah multi-logam berat dalam tanah serta menentukan kebutuhan bahan pengikat dalam S/S. Secara umum, beberapa sumber pustaka sangat mendukung kesimpulan bahwa logam berat mampu diimobilisasi dengan menggunakan stabilisasi/solidifikasi.

Tabel 4. 6 Studi yang Berhasil Menerapkan S/S untuk Imobilisasi Logam Berat

No.	Sumber Pustaka	Hasil Penelitian
1.	Moon <i>et al.</i> , 2008	Stabilisasi pada tanah tercemar logam berat arsen dengan menggunakan <i>cement kiln dust</i> (CKD).
2.	Yin <i>et al.</i> , 2006	S/S tanah terkontaminasi timbal dengan bahan pengikat semen : abu sekam padi (90:10 , 80: 20 , 70:30) Perbandingan binder:tanah tercemar = (0,5 ; 1,0 ; 2,0)
3.	Lee <i>et al.</i> , 2009	S/S tanah tercemar kadmium, timbal, dan seng dengan kapur, lumpur merah, <i>furnace slag</i> .
4	Alpaslan dan Yukseken, 2001	S/S tanah terkontaminasi timbal dengan kapur dan semen memiliki efisiensi imobilisasi logam Pb sebesar 88%

C. Pengolahan Tanah Tercemar

Pengolahan tanah tercemar yang dapat dilakukan di kawasan tambang Sungai Lembing adalah dengan cara S/S secara *in situ*. Teknik S/S ini melibatkan alat berat untuk menggali dan mengaduk tanah tercemar dengan bahan pengikat. Setelah melakukan studi kelayakan, didapatkan komposisi bahan pengikat yang akan digunakan untuk S/S skala lapangan pada tanah tercemar logam berat kawasan tambang Sungai Lembing. Alat pencampur yang memungkinkan untuk digunakan untuk S/S tanah tercemar di kawasan Sungai Lembing adalah ekskavator. Ekskavator dipilih karena kedalaman pencemaran logam berat pada tanah di kawasan Sangon mencapai kedalaman kurang dari

2 meter (Ahmad dan Al-Mahaqori, 2014). Ekskavator memiliki kemampuan mengaduk tanah hingga kedalaman 2 meter. Selain itu ekskavator lebih umum digunakan untuk kegiatan-kegiatan konstruksi dibandingkan bor yang memiliki kemampuan injeksi reagen.

Karena lokasi tambang terletak di dekat sungai, maka perlu dilakukan pembendungan sungai disekitar tanah tercemar guna mengurangi kadar air saat proses S/S. Pembendungan sungai dapat dilakukan dengan sistem pemompaan seperti yang dilakukan pada proyek remediasi kolam tar Sydney.

Proses pengadukan bahan pengikat S/S dan tanah tercemar berpotensi menghasilkan bau dan gas. Timbulnya bau dan gas dapat diatasi dengan menyemprotkan *foam* saat proses pengadukan berlangsung. *Foam* yang biasa digunakan untuk kegiatan pengadukan tanah dangkal adalah Rusmar® *foam* yang bisa diatur durasi penyemprotannya. Karena letak tambang berdekatan dengan lokasi pariwisata maka pengadaan *foam* perlu dipertimbangkan.



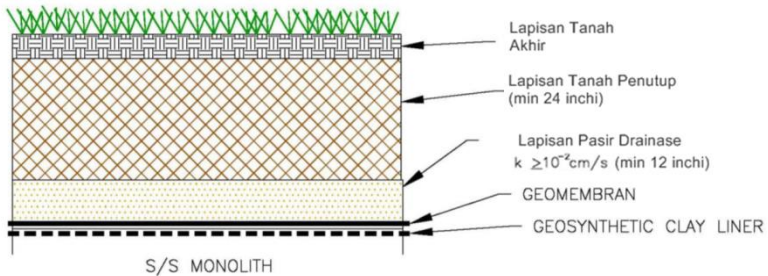
Gambar 4. 24 Penggunaan Foam pada Proses S/S untuk Pengendalian Bau dan Uap

Sumber: Rusmarinc, 2017

D. Penutupan

Menurut Arifin *et al.* (2010) kawasan bekas tambang Sungai Lembing akan dijadikan kawasan pariwisata. Oleh karena itu diperlukan penutupan untuk dapat memanfaatkan lahan yang sudah disolidifikasi. Desain penutupan dapat mengadopsi desain penutupan pada kolam tar Sydney dikarenakan kondisi lokasi

yang relatif sama yaitu didekat badan air. Contoh penutupan yang bisa digunakan pada bekas kawasan tambang Sungai Lembing dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4. 25 Penutupan S/S dengan Konfigurasi Geomembran dan *Geosynthetic Clay Liner*

4.4.2.2 Rekomendasi Penanganan Tanah Tercemar di Kawasan Tambang Emas Rakyat Sangon, Kulon Progo

A. Pemilihan Metode Stabilisasi/Solidifikasi

Metode yang disarankan untuk digunakan dalam remediasi tanah tercemar merkuri di kawasan tambang Sangon ini adalah S/S secara *ex situ*. Hal ini dikarenakan kawasan tambang emas Sangon merupakan kawasan tambang emas yang dikerjakan secara tradisional dengan teknik amalgasi yang dilakukan di gelundung. Pencemaran tanah terjadi di sekitar lokasi gelundung yang tersebar dan jauh dari lokasi penduduk (Setiabudi, 2005). S/S secara *in situ* kurang efektif dikarenakan perlu dilakukan kegiatan S/S di lokasi gelundung yang berbeda dan tersebar. Sampel tanah tercemar di setiap gelundung perlu dilakukan pengujian karakteristik fisik dan kimianya. Apabila sampel tanah tercemar di setiap gelundung mempunyai karakteristik yang berbeda, maka diperlukan jenis reagen S/S yang berbeda pula.

Dengan S/S secara *ex situ* sampel tanah tercemar di setiap gelundung dapat digali dan selanjutnya dikompositkan. Sehingga pengujian karakteristik fisik dan kimia hanya dilakukan satu kali. Jenis reagen S/S yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan lebih efektif. Penggalan tanah tercemar dapat

menggunakan tenaga pekerja atau alat berat yang umum digunakan dalam kegiatan konstruksi, seperti ekskavator. penggalian. Selanjutnya dibutuhkan kendaraan pengangkut tanah yang terkontaminasi untuk diolah di tempat pengolahan yang terpisah.

B. Studi Kelayakan

Studi kelayakan diperlukan untuk membuktikan kemampuan S/S dalam mengolah merkuri dalam tanah serta menentukan kebutuhan bahan pengikat dalam S/S. Secara umum, beberapa sumber pustaka sangat mendukung kesimpulan bahwa logam berat merkuri mampu diimobilisasi dengan menggunakan stabilisasi/solidifikasi. Beberapa studi yang telah berhasil menerapkan S/S untuk imobilisasi merkuri diantaranya:

Tabel 4. 7 Studi yang Berhasil Menerapkan S/S untuk Imobilisasi Merkuri

No.	Sumber Pustaka	Hasil Penelitian
1.	Zhuang <i>et al.</i> , 2004	Stabilisasi pada lumpur pemurnian air garam dengan menggunakan 6% bubur semen mampu menurunkan konsentrasi merkuri dari 966 µg/mg (TCLP) menjadi 0,024 mg/L (TCLP).
2.	Zhang <i>et al.</i> , 2009	Tanah terkontaminasi merkuri nitrat ditangani dengan S/S yang menggunakan <i>thiol-functionalized zeolite</i> 5% (TFZ/limbah) dan semen <i>portland</i> 100% (semen/limbah).
3.	Zhang dan Bishop, 2002	Penggunaan <i>Powder activated carbon</i> (PAC) dan semen untuk S/S merkuri dalam limbah. Hasil menunjukkan limbah dengan konsentrasi awal merkuri 1000 mg/kg mampu melewati uji TCLP dengan baik.
4	Anisa, 2016	S/S tanah tercemar merkuri menggunakan campuran semen <i>portland</i> dan tanah tras mampu menurunkan konsentrasi merkuri hingga 97,25%

Penerapan S/S tergantung pada mobilitas merkuri, Kemampuan pelindian merkuri meningkat seiring berkurangnya nilai pH. Namun senyawa merkuri yang mudah larut juga dapat terbentuk pada pH yang lebih tinggi (US EPA, 2007). Nilai pH pada tanah kawasan tambang Sangon menurut Anisa (2016) adalah sebesar 6,78. Nilai pH ini relatif netral dan sesuai dengan karakter tanah pada umumnya yaitu 6-8.

Bahan solidifikasi yang disarankan adalah campuran *fly ash* dengan penambahan kapur. Menurut Dermatas dan Meng (2003) penggunaan *fly ash* dan kapur mampu menghasilkan kuat tekan yang baik. Penggunaan *fly ash* dan kapur mampu mensubstitusi penggunaan semen yang mahal dan menimbulkan perkerasan lahan.

C. Pengolahan Tanah Tercemar

Pengolahan tanah tercemar yang dapat dilakukan di kawasan tambang Sangon adalah dengan S/S secara *ex situ*. Teknik S/S ini melibatkan alat berat untuk menggali tanah tercemar untuk diambil dan diangkut menuju tempat pengolahan. Setelah melakukan studi kelayakan, didapatkan komposisi bahan pengikat yang akan digunakan untuk S/S skala lapangan pada tanah tercemar merkuri kawasan tambang Sangon.

Kegiatan pengolahan yang direkomendasikan adalah pengolahan di luar lokasi pencemaran (*off-site*). Pengolahan *off-site* ini memanfaatkan pihak pengolah limbah B3 yang ada di sekitar kawasan Sangon. Pengolahan secara *on-site* tidak memungkinkan untuk dilakukan di kawasan ini dikarenakan lahan yang terbatas dan lokasi pencemaran tanah yang tersebar. Sedangkan pengolahan secara *on-site* memerlukan ruang yang cukup untuk persediaan bahan S/S dan tanah tercemar yang akan diolah. Selain itu diperlukan pula ruang yang cukup untuk menyimpan produk S/S hingga kegiatan remediasi dengan S/S selesai.

Sebelum tanah tercemar digali dan diangkut, dilakukan kegiatan pembongkaran. Kegiatan pembongkaran dibutuhkan untuk menghilangkan benda-benda yang ada diatas tanah tercemar, termasuk tumbuhan. Tujuan dari pembongkaran adalah untuk memudahkan penggalian tanah tercemar. Kegiatan berikutnya adalah penggalian tanah tercemar. Tanah tercemar

digali dan dipindahkan ke kendaraan pengangkut untuk dibawa ke tempat pengolahan yang berada di luar kawasan Sangon.



Gambar 4. 26 Penggalan Tanah Menggunakan Ekskavator
Sumber: Geo-Solutions, 2014

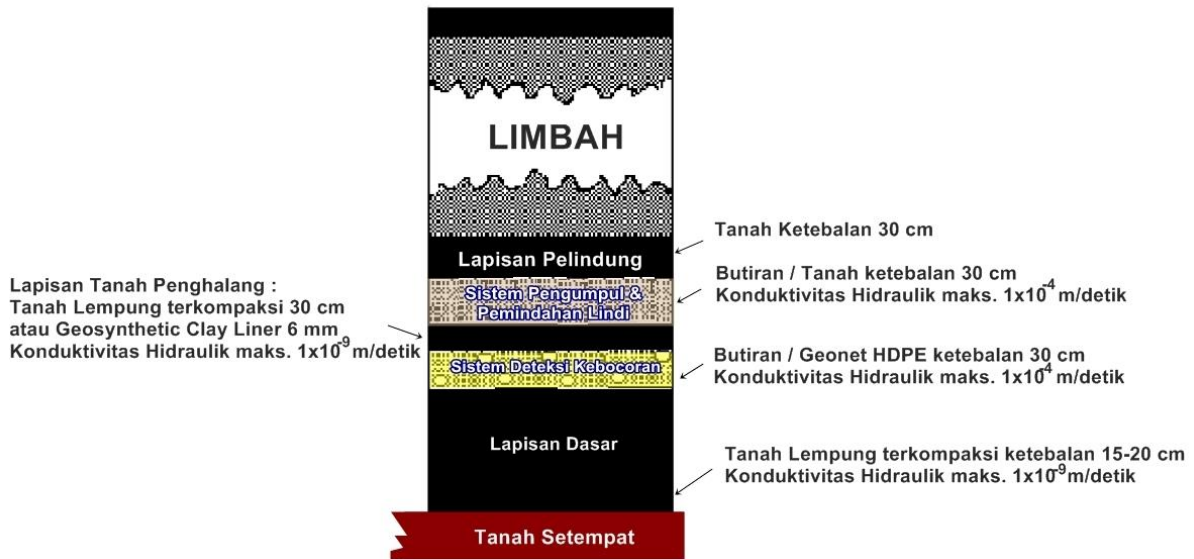
Pengolahan tanah tercemar yang direkomendasikan yaitu memanfaatkan pihak pengolah limbah B3. Pihak pengolah limbah B3 harus mempunyai fasilitas S/S yang memadai. Fasilitas S/S yang dibutuhkan adalah alat pencampur reagen S/S dan tanah tercemar (*mixing chamber*). Beberapa jenis *mixing chamber* yang sering digunakan untuk S/S diantaranya *pug-mill mixers*, *screw mixers*, dan *ribbon blenders*.

D. Penimbunan

Produk S/S selanjutnya dibuang dengan cara ditimbun di *landfill* limbah B3 yang terletak di luar kawasan tambang Sangon (*off-site*). Kawasan tambang Sangon tidak memungkinkan untuk diterapkan penimbunan produk S/S secara *on-site*. Penimbunan secara *on-site* perlu mempertimbangkan penempatan dan pemadatan produk S/S. Lokasi tanah tercemar yang tersebar dan tidak luas menyebabkan penempatan dan pemadatan dengan alat berat tidak efektif.

Pada penimbunan produk S/S perlu diperhatikan nilai uji TCLP dari produk tersebut. Nilai uji TCLP akan menentukan kategori limbah menurut PP No. 101/ 2014 tentang pengelolaan limbah B3. Kategori ini akan menentukan konfigurasi *landfill*

limbah B3 yang dibutuhkan. Menurut Anisa (2016) konsentrasi merkuri pada tanah tercemar di kawasan Sangon termasuk dalam kategori 3. Konfigurasi liner yang berlaku untuk *landfill* kategori 3 adalah liner berupa *clay*. Gambar 4.27 merupakan gambar *landfill* kategori 3.



Gambar 4. 27 Rancang Bangun Landfill Kategori 3
 Sumber :Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.101, 2014

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian pustaka ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Mekanisme stabilisasi/solidifikasi adalah mengurangi sifat berbahaya limbah dengan cara mengurangi laju migrasi dan toksisitasnya. Laju migrasi dan toksisitas berkurang akibat terikatnya limbah B3 karena penambahan bahan pendukung dan berubahnya sifat fisik limbah yang menurunkan kelarutan dan imobilisasi kontaminan. Teknologi stabilisasi/solidifikasi terbagi menjadi tiga bagian, yaitu secara fisik, kimia, dan termal.
2. Keunggulan aplikasi proses S/S dalam remediasi tanah tercemar limbah B3 diantaranya:
 - a. Produk memiliki stabilitas jangka panjang yang baik.
 - b. Bahan yang digunakan tidak beracun.
 - c. Produk tahan terhadap biodegradasi.
 - d. Solubilitas produk rendah.
 - e. Permeabilitas air relatif rendah.
 - f. Dapat diterapkan pada berbagai macam kontaminan.
 - g. Dapat diterapkan pada berbagai macam jenis tanah.

Sedangkan kelemahan aplikasi proses S/S dalam remediasi tanah tercemar limbah B3 diantaranya:

- a. Kontaminan masih ada di dalam tanah, tidak rusak atau hilang.
 - b. *Volatile organic compound* dan beberapa partikulat dapat keluar saat proses pengolahan.
 - c. Terkadang bahan pengikat sulit dimasukkan dan diaduk ke dalam tanah.
3. Kasus pencemaran tanah yang berhasil ditangani dengan stabilisasi/solidifikasi adalah kasus remediasi kolam tar Sydney yang dilakukan dengan cara *in situ*. Campuran bahan pengikat yang digunakan adalah campuran semen

portland, *slag*, dan abu terbang. Pengadukan tanah dan bahan pengikat menggunakan ekskavator. Penutupan dilakukan dengan menggunakan konfigurasi *Geosynthetic Clay Liner* dan Geotekstil. Lahan yang telah diremediasi dimanfaatkan untuk taman publik.

4. Kasus pencemaran tanah oleh merkuri di kawasan tambang emas rakyat Sangon, Kulon Progo belum mendapatkan upaya remediasi. Remediasi tanah tercemar yang direkomendasikan adalah stabilisasi/solidifikasi secara *ex situ*. Pengolahan tanah tercemar dengan bahan pengikat *fly ash* dan kapur dilakukan secara *off-site* dengan kerjasama pihak pengolah limbah B3. Produk S/S dari tanah tercemar merkuri ditimbun dalam *landfill* kategori 3.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil kajian pustaka ini adalah:

1. Diperlukan kajian pustaka mengenai biaya yang dibutuhkan untuk menerapkan variasi metode S/S.
2. Diperlukan studi kasus mengenai tanah tercemar limbah B3 yang lebih bervariasi baik lokasi maupun dari segi penerapan S/S.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 226.3R-3 1993. **Manual of Concrete Practice**. American Concrete Institute, USA.
- Adams, J.,W. dan Kalb, P., D. 2001. **Sulfur Polymer Stabilization/Solidification (SPSS) Treatability of Los Alamos National Laboratory Mercury Waste**. Brookhaven National Laboratory, USA.
- AECOM. 2008. Remediation of the Tar Ponds and Coke Ovens Sites Design and Construction Oversight Services 100 Percent Design Report TP6B. Sydney Tar Ponds Agency. Sydney, Canada.
- AECOM. 2009. Remediation of the Tar Ponds and Coke Ovens Sites Design and Construction Oversight Services Final Pilot Scale Report. Sydney Tar Ponds Agency. Sydney, Canada.
- Agung, L.N. dan Hutamadi, R. 2012. "Paparan Merkuri Di Daerah Pertambangan Emas Rakyat Cisoka, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten: Suatu Tinjauan Geologi Medis". **Buletin Sumber Daya Geologi** 7, 3.
- Ahmad, A.K., dan Al-Mahaqori, S.A. 2014. "Assessment of Abandoned Mine Impacts on Concentrations and Distribution of Heavy Metals in Surface Sediments of Catchments Around Sungai Lembing Abandoned Tin Mine". **Iranic Journal of Energy & Environment** 5, 4: 453-460.
- Akkas, M., Tasci, E., Yilmaz, B., Isik, I. 2014. "The Effects of Addition Two Different Type of Trass to the Clinkering Reaction". **Gazi University Journal of Science** 27, 1: 701-708.
- Ali, M.S., Khan, I.A., Hossain, M.I. 2008. "Chemical Analysis of Ordinary Portland Cement of Bangladesh". **Chemical Engineering Research Bulletin**12, 7-10.

- Alp, I., Deveci, H., Sungun, Y.H., Yilmaz, A.O., Kesimal, A., Yilmaz, E. 2009. "Pozzolan Characteristics of A Natural Raw Material For Use in Blended Cements". **Iranian Journal of Science & Technology** 33, 291-300.
- Alpaslan, B., dan Yukselen, H.A. 2001. "Remediation of Lead Contaminated Soils By Stabilization/Solidification". **Water, Air, and Soil Pollution** 133: 253-263.
- Alshaebi, F.Y., Yaacob, W.Z.W., Samsudin, A.R., Alsabahi, E. 2009. "Risk Assessment at Abandoned Tin Mine In Sungai Lembing, Pahang, Malaysia". **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering** 14: 1-9.
- Anisa, E.D.K.P. 2016. **Stabilisasi/Solidifikasi Tanah Tercemar Merkuri Tambang Emas Rakyat Kulon Progo Yogyakarta Menggunakan Campuran Semen Portland dan Tanah Tras**. Tugas Akhir. Teknik Lingkungan FTSP-ITS, Surabaya.
- Arifin, M.H., Rafek, A.G., Abdullah, I., Umor, M.R. 2010. "Conservation Geology and Rehabilitation of Old Tunnels at Sungai Lembing, Kuantan, Pahang as a Geological Heritage Site". **Bulletin of Geological Society of Malaysia** 56: 61-66.
- ASTM Standards. 1994. **Coal Fly Ash and Raw of Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement**. ASTM International, West Conshohocken
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Kulon Progo. 2016. **Kecamatan Kokap Dalam Angka**.
- Badan Standarisasi Nasional. 1990. SNI 03-1974-1990. **Metode Pengujian Kuat Tekan Beton**.
- Badan Standarisasi Nasional. 2004. SNI 15-2049-2004. **Semen Portland**.
- Banunaek, Z.A. 2016. **Pencemaran Merkuri di Lahan Pertambangan Emas Rakyat dan Strategi**

- Pengendaliannya.** Tesis. Teknik Lingkungan FTSP-ITS, Surabaya.
- Bates, E., Hills, C. 2015. **Stabilization and Solidification of Contaminated Soil and Waste: A Manual of Practice.** Hygge Media.
- Bui, L.A., Chen, C., Hwang, C., Wu, W. 2012. "Effect of Silica Forms in Rice Husk Ash on The Properties of Concrete". **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials** 19, 33: 252-258.
- Castelo-Grande T., Barbosa D. 2003. "Soil Decontamination By Supercritical Extraction". **Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry** 2, 2: 331-336.
- Cocke, D. L. 1990. "The Binding Chemistry and Leaching Mechanisms of Hazardous Substances in Cementitious Solidification/Stabilization Systems". **Journal of Hazardous Materials** 24; 231-253.
- Dermatas, D. dan Meng, X. 2003. "Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils". **Engineering Geology** 70: 377-394.
- Facchinelli, A., Sacchi, E., Mallen, L. 2001. "Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils". **Environmental Pollution** 114: 313-324.
- Gonzalez, S.F., Van Loo, L.R., Gimmi, T., Jakob, A., Glaus, M.A., dan Diamond, L.W. 2008. "Self Diffusion of Water and Its Dependence on Temperature and Ionic Strength in Highly Compacted Montmorillonite, Illite, and Kaolinite". **Journal of Applied Geochemistry** 23: 3840-3851.
- Handrianto, P., Rahayu, S. Y., Yuliani. 2012. "Teknologi Bioremediasi dalam Mengatasi Tanah Tercemar Hidrokarbon". **Prosiding Seminar Nasional Kimia**

- Unesa 2012**, Surabaya: FMIPA Universitas Negeri Surabaya, 25 Februari 2012, 22-30.
- Karamalidis, A.K. dan Voudrias, E.A. 2007. "Cement-Based Stabilization/Solidification of Refinery Sludge: Leaching Behavior of Alkanes and PAHs". **Journal of Hazardous Materials** 148: 122-135.
- Katsioti, M., Katsioti, N., Rouni, G., Bakirtiz, D., Loizidou, M. 2008. "The Effect of Bentonite/Cement Mortar for The Stabilization/Solidification of Sewage Sludge Containing Heavy Metals". **Cement and Concrete Composites** 30: 1013-1019.
- Kementrian Lingkungan Hidup. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003 Tentang **Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi secara Biologis**.
- LaGrega, M.D., Buckingham P.I., Evans, J.C. 1994. **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, Inc: Singapore.
- LaGrega, M.D., Buckingham P.I., Evans, J.C. 2001. **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, Inc: Singapore.
- Larkin, R. 2008. Sydney Tar Ponds & Coke Ovens Remediation Project. Remediation Technologies Symposium. Sydney, Canada.
- Lee, S., Lee, J., Choi, Y.J., Kim, J. 2009. "In Situ Stabilization of Cadmium-, Lead-, and Zinc-contaminated Soil Using Various Amendments". **Chemosphere**, 77: 1069-1075.
- MacNeil, J., Ingraham, D., Gangopadhyay, S., Zutphen, V.V. 2012. Managing Program and Project Requirements during Sediment Stabilization at the Sydney Tar Ponds. Nordlys Environmental.

- Marzuki, P.F. dan Jogaswara, E. 2007. **Potensi Semen Alternatif dengan Bahan Dasar Kapur Padalarang dan Fly ash Suralaya untuk konstruksi Rumah Sederhana**. Seminar Nasional Sustainability dalam Bidang Material, Rekayasa, dan Konstruksi Beton.
- Mauger, N., Butalia, T., Wolfe, W., Moore, C. 2014. "Beneficial Use of Drill Cuttings". **Eastern Unconventional Oil and Gas Symposium. Kentucky, USA**, 5-7. November.
- Moon, D.H., Wazne, M., Yoon, I., Grubb, D.G. 2008. "Assessment of Cement Kiln Dust (CKD) for Stabilization/Solidification (S/S) of Arsenic Contaminated Soils". **Journal of Hazardous Materials** 159 : 512-518
- Muniyandi, S. K., Sohaili, J., Hassan. A. 2014. "Encapsulation of Nonmetallic Fractions Recovered from Printed Circuit Boards Waste with Thermoplastic". **Journal of The Air and Waste Management Association** 64 : 9, 1085-1092.
- Mursito, A. T. 2004. "Raw Mix Design Klinker Semen Portland Alternatif Berbasis Limbah Asetilen dan Pozzolan Alam". **Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses**. Universitas Diponegoro Semarang.
- Noble, B., dan MacDonald, D. 2011. Remediation at the Sydney Tar Ponds and Coke Oven Sites. RPIC Federal Contaminated Sites Regional Workshop. Sydney, Canada.
- Odor and Emission Control. Rusmar Foam Technology. West Chester, Pennsylvania.
- Paat, F.E.S., Steenie E, W., Reky S, W. 2014. "Kuat Tarik Lentur Beton *Geopolymer* Berbasis Abu Terbang (*Fly Ash*)". **Jurnal Teknik Sipil** 2: 337-343.
- Palar, H. 2008. **Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat**. Rineka Cipta, Jakarta.

- Palar, H., S. Monintja., Turangan, A.E., A.N. Sarajar. 2013. "Pengaruh Pencampuran Tras dan Kapur Pada Lempung Ekspansif Terhadap Nilai Daya Dukung". **Jurnal Teknik Sipil Statik** 1: 390-399.
- Pamayo, I.A. 2016. **Stabilisasi/Solidifikasi Timbunan Tailing Penambangan Emas Rakyat Kulon Progo Menggunakan Semen Portland**. Tugas Akhir. Teknik Lingkungan FTSP-ITS, Surabaya.
- Paria, S. dan Yuet, K. 2006. "Solidification/Stabilization of Organic and Inorganic Contaminants Using Portland Cement". **A Literature Review. Environmental Reviews** 14: 217-255
- Pavel, L.V. dan Gavrilescu M. 2008. "Overview of *Ex Situ* Decontamination Techniques for Soil Cleanup". **Environmental Engineering and Management Journal** 7, 6: 815-834.
- Pemerintah Republik Indonesia. Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 Tentang **Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun**.
- Putra, D. 2006. "Penambahan Abu Sekam Pada Beton Dalam Mengantisipasi Kerusakan Akibat Magnesium Sulfat Pada Air Laut". **Jurnal Ilmiah Teknik Sipil** 10, 2: 195-203.
- Randall, P. dan Chattopadhyay, S. 2004." Advances in Encapsulation Technologies for The Management of Mercury-contaminated Hazardous Wastes". **Journal of Hazardous Material** B114: 211–223.
- Rusyandi, K., Mukodas, J., dan Gunawan, Y. 2012. "Perancangan Beton Self Compacting Concrete (Beton Memadat Sendiri) dengan Penambahan Fly ash dan Structuro". **Jurnal Konstruksi** 10.
- Scanferla, P., Ferrari, G., Pelay. Roberto., Ghirardini, A.V., Zanetto. G., Libralato. G. 2009. "An Innovative Stabilization/Solidification Treatment for Contaminated

- Soil Remediation: Demonstration Project Results". **Soils Sediments** 9: 229-236.
- Setiabudi, B.T. 2005. **Penyebaran Merkuri Akibat Usaha Pertambangan Emas Di Daerah Sangon, Kabupaten Kulon Progo, D.I. Yogyakarta**. Kolokium Hasil Lapangan-Subdit Konservasi DIY.
- Sharma, H. D., and Reddy, K. R. 2004. "Geoenviromental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies." Wiley, New York.
- Singh, D., Wagh, A. ., Tlustochowicz, M., Jeong, S. 1998. "Phosphate Ceramic Process for Macroencapsulation and Stabilization of Low-level Debris Wastes". **Waste Management** 18: 135–143.
- Sivakumar,G. 2009. "Investigation on the Hydration Properties of the Rice Husk Ash Cement Using FTIR and SEM". **Applied Physics Research**. 1 (2).
- Spence, R.D. dan Shi, C. 2005. **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes**. CRC Press.
- Stankovic, N., Logar, M., Lukovic, J., Pantic, J., Miljevic, M., Babic, B., dan Mihajlovic, A.R. 2011. "Characterization of Bentonite Clay from "Greda" Deposit". **Processing and Application of Ceramics** 5: 97-101
- Suryoatmono, B. dan Susilorini, R. 2007. "Trass, Masa Depan Bagi Pozzolan Alam Sebagai Agregat Alternatif Untuk Campuran Beton". **Seminar Nasional "Sustainability dalam Bidang Material, Rekayasa dan Konstruksi Beton"**.
- Swarnalatha, S., Arasakumari, M., Gnanamani, A., Sekaran, G. 2006. "Solidification/Stabilization of Thermallytreated Toxic Tannery Sludge". **Journal of Chemical Technology & Biotechnology** 81: 1307-1315.

- Trihadiningrum, Y. 2016. **Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun**. Teknosain, Yogyakarta.
- Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J., Leroueil, S. 2002. "Influence of The Nature of Organic Compounds on Fine Soil Stabilization with Cement". **Canadian Geotechnical Journal** 39, 3: 535-546.
- Trussell, S. dan Spence, R.D. 1994. " A Review of Solidification/Stabilization Interferences". **Waste Management** 14, 6: 507-519.
- US EPA. 1986. **Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Wastes**. Office of Research and Development. EPA/540/2-86/1001; Cincinnati, OH.
- US EPA. 1992. **Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) Method**. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods. EPA Publication SW-846; Washington DC, USA.
- US EPA. 1993. **Engineering Bulletin: Stabilization/Solidification of Organics and Inorganics**. Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
- US EPA. 1994. **Liquid Release Test Procedure**. U.S. Environmental Protection Agencies.
- US EPA. 1999. **Stabilization/Solidification Resource Guide**. Office of Solid Waste and Emergency Response, USA.
- US EPA. 2000. **Stabilization/Solidification Use at Superfund Sites**. Office of Solid Waste and Emergency Response, USA.
- US EPA. 2004. **Paint Filter Liquid Test**. U.S. Environmental Protection Agencies.
- US EPA. 2006. **In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil**. EPA Publication 542-F-06-013; Washington DC, USA.

- US EPA. 2012. **A citizen's Guide to Solidification and Stabilization**. EPA 542-f-12-019, USEPA.
- Utomo, M.P. dan Laksono, E.W. 2007. "Kajian Tentang Proses Solidifikasi/Stabilisasi Logam Berat dalam Limbah dengan Semen Portland". **Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA**. Yogyakarta.
- Virkutyte, J., Sillanpaa, M., Latostenmaa, P. 2002. "Electrokinetic soil remediation-critical overview". **The Science of the Total Environment** 289: 97-121.
- Walker, T.R., MacAskill, D., Rushton, T., Thalheimer, A., Weaver, P. 2013. "Monitoring Effects of Remediation on Natural Sediment Recovery in Sydney Harbour, Nova Scotia." **Environ Monit Asses**. Canada.
- Walker, T.R., MacAskill, D., Thalheimer, A. 2016. *Assesing Sydney Tar Ponds Remediation and Natural Sediment Recovery in Nova Scotia, Canada*. Dillon Consulting.
- Wardhana, W.A. 2001. **Dampak Pencemaran Lingkungan**. Yogyakarta : Andi Offset.
- Wijaya, D. 2005. **Pengaruh Fly Ash dan pH terhadap Kestabilan Benda Hasil Proses Solidifikasi Limbah Cr(VI)**. Tugas Akhir. Teknik Lingkungan FTSP-ITS, Surabaya.
- Wiqoyah, Q. 2007. "Pengaruh Tras Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah Lempung". **Jurnal Dinamika Teknik Sipil** 7: 147-153.
- Wiryasa, N.M.A., dan Sudarsana, I.W. 2009. "Pemanfaatan Lumpur Lapindo Sebagai Bahan Substitusi Semen dalam Pembuatan Bata Beton Pejal". **Jurnal Ilmiah Teknik Sipil** 13, 1 : 39-46.
- Yin, C.Y., Hilmi B.M., Md Ghazaly, S. 2006. "Stabilization/solidification of lead-contaminated soil using cement and rice husk ash". **Journal of Hazardous Materials** B137: 1758-1764.

- Yoleva, A., Djambazov, S., Chernev, G. 2011. "Influence of The Pozzolanic Additives Trass and Zeolite of Cement Properties". **Journal of The University of Chemical Technology and Metallurgy** 46, 3: 261-266.
- Yousuf, M., Mollah, A., Vempati, R.K., Lin, T.C., David, L.C. 1995. "The Interfacial Chemistry of Solidification/Stabilization of Metals In Cement and Pozzolanic Material Systems". **Waste Management** 15, 2: 137-148.
- Zhang, J., dan Bishop, P.L. 2002. "Stabilization/Solidification (S/S) of Mercury-Containing Waste Using Reactivated Carbon and Portland Cement". **Journal of Hazardous Materials** B92, 199-212.
- Zhang, X., Wang, Q., Zhang, S., Sun, X., Zhang, Z. 2009. "Stabilization/solidification (S/S) of Mercury-contaminated Hazardous Wastes Using Thiol-functionalized Zeolite and Portland Cement". **Journal of Hazardous Materials** 168: 1575-1580.
- Zhen, G., Lu, X., Cheng, X., Chen, H., Yan, X., Zhao, Y. 2012. "Hydration Process of the Aluminate $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ -assisted Portland cement-based Solidification/Stabilization of Sewage Sludge". **Journal of Construction and Building Materials** 30: 675-681.
- Zhuang, J.M., Lo, T., Walsh, T., Lam, T. 2004. "Stabilization of High Mercury Contaminated Brine Purification Sludge". **Journal of Hazardous Materials** B113, 157-164.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis yang memiliki nama lengkap Royyan Anrozi lahir di Malang pada tanggal 26 Juli 1996. Penulis mengenyam pendidikan dasar pada tahun 2002-2008 di SDN Arjowinangun II Kota Malang. Kemudian dilanjutkan di SMPN 8 Malang pada tahun 2008-2011. Adapun pendidikan tingkat atas dilalui di SMAN 4 Malang pada tahun 2011-2013. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITS, Surabaya pada

Tahun 2013 dan terdaftar dengan NRP 3313 100 040.

Selama perkuliahan, penulis aktif sebagai panitia di berbagai kegiatan HMTL dan aktif sebagai asisten laboratorium Teknik Analisis Pencemar Lingkungan dan Mikrobiologi Lingkungan. Semasa kuliah, penulis terdaftar sebagai pengurus aktif Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) ITS, Surabaya. Penulis menjabat sebagai staff bidang internal departemen dalam negeri HMTL periode kepengurusan 2014-2015 dan sebagai kepala bidang internal departemen dalam negeri pada periode kepengurusan 2015-2016. Pengalaman di lapangan yang dimiliki penulis adalah pernah melakukan Kerja Pratik di PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk. di divisi *Health and Safety Environment* (HSE). Berbagai pelatihan serta seminar di bidang teknik lingkungan juga telah diikuti dalam rangka pengembangan diri seperti pelatihan ISO 14001:2015. Penulis dapat dihubungi via email royyananrozi26@gmail.com